

ВИШУКУВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ДОРІГ ТА ПЕРЕХОДІВ ЧЕРЕЗ ВОДОТОКИ

УДК 627.13:519.711.3

Славінська О.С., д.т.н.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИДОННІЙ ОБЛАСТІ РУСЛОВИХ ТА ЗАПЛАВНИХ ПОТОКІВ У ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

Анотація. В статті представлено метод розрахунку гідродинамічних характеристик придонної області руслових та заплавних потоків у зоні впливу мостових переходів, ґрунтуючись на положеннях механіки неоднорідних середовищ. В рамках дискретної концепції, отримано математичну модель для придонної області руслового потоку, яка окремо описує: рух твердої фази та рух рідкої фази в комплексі з замикаючими рівняннями, що враховують стан потоку та інерційність руслових структур. Для заплавних ділянок запропоновано систему рівнянь, яка враховує наявність зависі та вплив опору від рослинності на динаміку потоку.

Ключові слова: русло, заплава, потік.

Аннотация. В статье представлено метод расчета гидродинамических характеристик придонной области русловых и пойменных потоков в зоне влияния мостовых переходов, основываясь на положениях механики неоднородных сред. В рамках дискретной концепции получено математическую модель для придонной области руслового потока, которая отдельно описывает: движение твердой фазы и движение жидкой фазы в комплексе с замыкающими уравнениями, учитывающих состояние потока и инерционность русловых структур. Для пойменных потоков предложено систему уравнений, учитывающих наличие взвеси и влияние сопротивления от растительности на динамику потока.

Ключевые слова: русло, пойма, поток.

Abstract. The method of hydrodynamical characteristics calculation in bottom area of channel and floodplain flow in the zone of bridges influence, based on the

provisions of the mechanics of inhomogeneous medium is presented in article. On the concept discrete, received a mathematical model for the river bottom area of channel flow, which apart described: the movement of solid phase; movement of the liquid phase together with the closure equations that take into account the state of flow and the lag of river bed structures. For rivers floodplain areas proposed system of equations, which depends on the suspension presence and resistance depend from of vegetation on the flow dynamics.

Keywords: channel, floodplain, stream.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день одним із ключових моментів на шляху вирішення проблеми забезпечення надійності і довговічності мостових споруд є всебічне вивчення механізму їх взаємодії з відкритим річковим потоком та розвиток відповідної теоретичної бази, що дозволить прогнозувати наслідки різних стихійних катастроф, розробляти план заходів з метою їх уникнення, а також дасть можливість підвищити науково-інженерний рівень проектів будівництва та реконструкції мостів.

Основою для правильного призначення необхідних розмірів споруд мостового переходу є прогнози можливого притоку води до мосту і неминучих руслових деформацій: загальних, величина яких обумовлена загальним стисненням водотоку і природним ходом руслового процесу, та місцевих розмивів, що є результатом локального порушення структури річкового потоку при обтіканні конструкцій інженерних споруд.

При розробці методів розрахунку деформацій в зоні впливу мостових переходів необхідно враховувати складну специфіку зависених природних потоків. Двофазний потік на відміну від однорідного характеризується: відповідними кожній з фаз усередненими та пульсаційними швидкостями, силами міжфазової взаємодії, зовнішніми для кожної фази та внутрішніми для всього потоку; додатковими ефективними напруженнями, які виникають за рахунок контактної взаємодії твердих часток між собою та дном; впливом анізотропних властивостей турбулентного стану природних русел. Обов'язково слід враховувати відмінності течії в руслових потоках – основного ядра та придонної області, де має місце чітке розмежування між дисперсною фазою, частками наносів, та несним середовищем – водним потоком.

Зона впливу мостового переходу, відповідно, розповсюджується не тільки в руслі річки, а й на заплавної частині. При цьому суттєво те, що витрата

заплавного потоку може перевищувати руслову. Поверхня заплави переважно покрита рослинністю, різною за густістю та розмірами заростей, що впливає на пропускну її здатність. Таким чином зона дослідження розвитку деформацій охоплює два постійно взаємодіючі зависенесні потоки з різною шорсткістю.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженню руху наносів присвячено велика кількість робіт [1-5]. При побудові теорій руху зважених наносів, як правило, вводиться цілий ряд припущень, головне з яких – заміна дискретної сукупності рухомих частинок деяким фіктивним суцільним середовищем змінної густини. З погляду можливостей інженерного розрахунку найбільш поширеною є дифузійна теорія руху зважених наносів [6]. Але ця теорія не може бути застосована для рішення задачі про витрату наносів, що переносяться в придонній області, також в цій теорії виключені з розгляду основні чинники механізму турбулізації потоку.

Визначення ж пропускної здатності та глибини розмиву на заплаві, спираючись на обмежені емпіричні рішення задачі у вигляді коефіцієнтів Манінга та Шезі [7], не може бути достатньо прийнятним.

Таким чином, **мета роботи** полягає в розробці методів прогнозування деформацій руслових та заплавних потоків в зоні впливу мостових переходів, ґрунтуючись на теорії неоднорідних потоків, яка дозволить врахувати особливості гідродинамічних процесів, що відбуваються в зависенесному середовищі.

Отримані наукові результати. На основі методу просторового усереднення [8, 9], шляхом переходу від мікрорівнянь до макрорівнянь, в рамках дискретної концепції отримано математичну модель для придонної області русла, яка складається в системі координат Ox_1x_3

- з рівнянь для дисперсної фази

$$\frac{\partial \overline{\rho_s}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_3}{\partial x_3} - \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_z}{\partial x_3} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{W}_1 \overline{\rho_s}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_1 \tilde{W}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_3 \tilde{W}_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_z \tilde{W}_1}{\partial x_3} = - \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_1 \tilde{W}_3''}{\partial x_3} + \alpha_m (\tilde{F}_{D1} + \tilde{F}_{L1} + \tilde{F}_{\omega 1}), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{W}_3 \overline{\rho_s}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_1 \tilde{W}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_1 \tilde{W}_z}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_3 \tilde{W}_3}{\partial x_3} - 2 \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_3 \tilde{W}_z}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{W}_z \tilde{W}_z}{\partial x_3} = - \frac{\partial}{\partial x_3} \overline{\rho_s} \left(\overline{W_3'^2} + \left(\overline{W_3'^2} \right)_{imp} \right) - \\ - \alpha_m \overline{F}_{GS} + \alpha_m (\tilde{F}_{D3} + \tilde{F}_{L3} + \tilde{F}_{\omega 3}), \end{aligned} \quad (3)$$

- з рівнянь для несного середовища

$$\frac{\partial \bar{\rho}_L}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_3}{\partial x_3} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_1 \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_3 \tilde{V}_1}{\partial x_3} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\mu_{LS} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial \bar{\rho}_L \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} - (1 - \alpha_m C_m / a_s) \times \\ & \times (\tilde{F}_{D1} + \tilde{F}_{L1} + \tilde{F}_{\omega 1}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_3}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_1 \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\rho}_L \tilde{V}_3 \tilde{V}_3}{\partial x_3} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_3} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\mu_{LS} \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial \bar{\rho}_L \overline{V_3^2}}{\partial x_3} - \alpha_m \frac{C_m}{a_s} F_{GS} - F_{GL} - \\ & - (1 - \alpha_m C_m / a_s) (\tilde{F}_{D3} + \tilde{F}_{L3} + \tilde{F}_{\omega 3}), \end{aligned} \quad (6)$$

де t – час; x_1, x_3 – координати, відповідно у поздовжньому та вертикальному напрямках; $\tilde{V}_1, \tilde{V}_3, \tilde{W}_1, \tilde{W}_3$ – усереднені складові швидкостей несного середовища та множини часток наносів; $\tilde{W}_z$ – гідравлічна крупність часток наносів; p – гідродинамічний тиск, μ_{SL} – динамічна в придонному шарі руслового потоку $\mu_{SL} = \mu_L (1 + 1.5\bar{S}) / (1 - \bar{S})^2$ [10]; C_m – коефіцієнт приєднаної маси [11]; $\bar{\rho}_s = \rho_s^o \bar{S}$ – маса множини часток, визначається на основі мутності потоку $\bar{S}$; ρ_s^o – густина твердої частки; $\bar{\rho}_L = \rho_L^o (1 - \bar{S})$ – густина несного середовища; ρ_L^o – густина води; $\alpha_m = \left(1 + \frac{C_m}{a_s} \right)^{-1}$; $a_s = \rho_s^o / \rho_L^o$; $\overline{V_1 V_3''}$, $\overline{V_3^2}$ – турбулентні напруги несного середовища, дотичні та нормальні; $\overline{W_1 W_3''}$, $\overline{W_3^2}, (\overline{W_3^2})_{imp}$ – кореляції пульсацій твердої фази за рахунок впливу турбулентного стану несного середовища, та контактної взаємодії з дном.

Рівняння (1-6) – були отримані для придонного шару максимальною товщиною 10 діаметрів [4] часток, що рухаються стрибкоподібно і активно беруть участь у формуванні транспорту донних наносів. Складові швидкостей в рівняннях (1-6), а також в наступних моделях, усереднені з ваговою функцією (щільність і тиск усереднюються звичайним способом) [12]

$$\tilde{V}_i = \overline{\rho' \tilde{V}_i} / \bar{\rho}, \quad \overline{V_i''} = -\overline{\rho' \tilde{V}_i} / \bar{\rho}, \quad \rho' \neq 0, \quad \overline{\rho' V_i''} = 0, \quad \overline{\rho' V_i} = \bar{\rho} (\tilde{V}_i + V_i^*). \quad (7)$$

Це дозволило отримати більш спрощену форму рівнянь переносу, оскільки для дисперсної фази та для несного середовища кореляції швидкості та мутності фігурують у неявному вигляді.

Зазвичай для розрахунку пристінних потоків використовується теорія межового шару. Але, згідно експериментальних даних, розглянутих в роботі [13], в придонному шарі руслового потоку має місце повне злиття в'язкого та нев'язкого потоків. В рівняннях (2-3), (5-6) прийнята оцінка мализни складових в наближенні до тонкого шару [12], де в'язкі члени та другі кореляційні моменти з похідними у поздовжньому напрямку ігноруються, а у вертикальному – лишаються. Це дає можливість розраховувати відривні та зворотні течії в придонній області, які виникають при пасмовій структурі дна

В рівняннях (2-3), (5-6) враховані

- проекції сили тяжіння з врахуванням дії сили Архімеда, відповідно, для рідкої та твердої фази

$$\bar{F}_{GL} = (\bar{\rho}_L + \bar{\rho}_S / a_S) g, \quad (8)$$

$$\bar{F}_{GS} = (\bar{\rho}_S - \bar{\rho}_S / a_S) g; \quad (9)$$

- *сила приєднаних мас* за припущенням, що приєднана рідина рухається зі швидкістю часток наносів $F_m = C_m \frac{d\bar{W}}{dt} \frac{\rho_S}{a_S}$;

- *сили міжфазної взаємодії* $\tilde{F}_{Di}, \tilde{F}_{Li}, \tilde{F}_{oi}$:

складові *сили опору руху*, яка утворена тиском та силами тертя в'язкого придонного шару

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{D1} = \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left((\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) \bar{\rho}_S (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) + \frac{2}{3} \gamma_{D2} \bar{\rho}_S \tilde{U}_r^{-2} \left((\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) (\bar{V}_1^2 - 2\bar{V}_1 \bar{W}_1'' + \bar{W}_1^2) + \right. \right. \\ \left. \left. + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3) (\bar{V}_1 \bar{V}_3'' - \bar{V}_1 \bar{W}_3'' - \bar{V}_3 \bar{W}_1'' + \bar{W}_1 \bar{W}_3'') \right) \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{D3} = \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left((\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z) \bar{\rho}_S (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) + \frac{2}{3} \gamma_{D2} \bar{\rho}_S \tilde{U}_r^{-2} \left((\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) (\bar{V}_1 \bar{V}_3'' - \bar{V}_1 \bar{W}_3'' - \bar{V}_3 \bar{W}_1'' + \bar{W}_1 \bar{W}_3'') + \right. \right. \\ \left. \left. + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z) (\bar{V}_3^2 - 2\bar{V}_3 \bar{W}_3'' + \bar{W}_3^2) \right) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

підйомна сила, яка обумовлена головним чином підвищенням по направленню від дна поздовжньої швидкості, яка несиметрично омиває частки наносів

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{L1} = & \gamma_L \tilde{U}_r \overline{\rho_s} \left(\frac{(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z)}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} - \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_3} \left(1 - \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}^* \varphi_{11}} \right) \frac{1}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} - \right. \right. \\
& - \frac{1}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_3} \right) - \overline{\omega_{2s} V_1''} - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}^* \varphi_{31}} - \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_3} \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}^* \varphi_{11}} \right) + \overline{\omega_{2s} W_1''} \left. \right) \right) - \\
& - \frac{(\overline{V_1 V_3''} - \overline{V_1 W_3''} - \overline{V_3 W_1''} + \overline{W_1 W_3''})}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) + \frac{1}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{13}} \right) + \\
& + \frac{1}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \right) - \overline{\omega_{2s} V_3''} - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_1} \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{33}} - \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{13}} \right) + \overline{\omega_{2s} W_3''} \right) \Bigg), \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\tilde{F}_{L3} = \gamma_L \tilde{U}_r \overline{\rho_s} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left(1 - \frac{(\overline{V_1^2} - 2\overline{V_1 W_1''} + \overline{W_1^2})}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2} \right); \quad (13)$$

- *сила Магнуса*, що може суттєво впливати на динаміку руху часток, які обертаються в процесі сальтації, оскільки її величину можна порівнювати з величиною сили опору [11]

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{\omega 1} = & \gamma_{\omega} \overline{\rho_s} \left[\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \right) - \overline{\omega_{2s} V_3''} + \right. \\
& + \left. \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_1} \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{33}} - \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{13}} \right) - \overline{\omega_{2s} W_3''} \right], \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{\omega 3} = & \gamma_{\omega} \overline{\rho_s} \left[\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_3} \right) - \overline{\omega_{2s} V_1''} + \right. \\
& + \left. \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}^* \varphi_{31}} - \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_3} \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}^* \varphi_{11}} \right) - \overline{\omega_{2s} W_1''} \right], \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\text{де } \gamma_{D1} = \frac{12 C_{\Phi 2} \tilde{U}_r}{C_{\Phi 1} a_s D \tilde{Re}_s},$$

$$\gamma_{D2} = \frac{2 C_{\Phi 2} \tilde{U}_r}{C_{\Phi 1} a_s D \tilde{Re}_s^{1/3}},$$

$$\tilde{U}_r = \sqrt{\sum_{i=1,2,3} (\tilde{V}_i - \tilde{W}_i + \delta_{i3} \tilde{W}_z)^2},$$

U_r – швидкість відносного руху фаз,

δ_{i3} – символ Кронекера,

$C_{\phi 1}$ – перший коефіцієнт форми частки,

D – діаметр частки,

$C_{\phi 2}$ – другий коефіцієнт форми частки,

$Re_s = DU_r \rho_L / \mu_{SL}$, поправкові коефіцієнти на нестационарність $\varphi_{Dt} = 1,1 \div 1,2$ та на

вплив інших часток, що рухаються поруч [9], $\varphi_{Ds} = (1 - \beta_s)^{-1}$, $\beta_s = \frac{3}{2} \frac{(\bar{S}^{1/3} - \bar{S})}{1 - \bar{S}}$ [9];

$\gamma_L = \frac{23}{20} \frac{C_{\phi 2}}{C_{\phi 1} a_s}$, $\gamma_\omega = \frac{C_\omega}{C_{\phi 1} a_s}$, $C_\omega = 0,4$ – коефіцієнт підйому від сили обертання [11];

ω_{js} – кутова швидкість частки, коефіцієнти $\gamma_{11}, \gamma_{33}, C_{t1}^*, \varphi_{11}, \varphi_{13}, \varphi_{33}, \varphi_{31}$ та кореляційні моменти $\overline{\omega_{2s}'' V_1''}, \overline{\omega_{2s}'' V_3''}, \overline{\omega_{2s}'' W_1''}, \overline{\omega_{2s}'' W_3''}$ представлені далі в формулах (22-26).

Для опису динамічної взаємодії фаз, під впливом сил $\tilde{F}_{Li}, \tilde{F}_{oi}$, отримано рівняння для поперечної складової кутової швидкості часток наносів ω_{Si} на основі Лагранжевого рівняння обертального руху одиночної сферичної частки [8]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{\omega}_{s2}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{\omega}_{s2} \tilde{W}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{\omega}_{s2} \tilde{W}_3}{\partial x_3} - \frac{\partial \overline{\rho_s} \tilde{\omega}_{s2} \tilde{W}_z}{\partial x_3} = - \frac{\partial (\overline{\rho_s} \omega_{s2}'' W_3'')}{\partial x_3} - \\ & - \beta_\omega \overline{\rho_s} \left(\tilde{\omega}_{s2} + \frac{15}{40} \left(\frac{\partial \beta_s^* \tilde{U}_{r3}}{\partial x_1} - \frac{\partial \beta_s^* \tilde{U}_{r1}}{\partial x_3} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} \right) \right), \end{aligned} \quad (16)$$

де кутові швидкості, $\tilde{\Omega}_{Ur2} = \frac{15}{40} \left(\frac{\partial \beta_s^* \tilde{U}_{r3}}{\partial x_1} - \frac{\partial \beta_s^* \tilde{U}_{r1}}{\partial x_3} \right)$ міжфазної взаємодії,

$\beta_s^* = \frac{\bar{S}^{1/3} - \bar{S}}{1 - \beta_s}$ коефіцієнт; $\beta_\omega = \frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \frac{10\pi}{a_s C_{\phi 1} D^2}$ – величина, яка зворотна часу обертальної

релаксації частки.

Для розрахунку усереднених характеристик турбулентності руслових потоків розроблено пристосовану до умов придонної області замикаючу $k-\varepsilon$ модель турбулентності несного середовища в системі координат Ox_1x_3

$$\begin{aligned} & \frac{\partial K_{Lt}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{V}_1 K_{Lt}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3 K_{Lt}}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{\overline{\mu_{SL}}}{\overline{\rho_L}} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{K_{Lt}}{\overline{\rho_L}} \right) + \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K_{Lt}}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{\overline{\mu_{SL}}}{\overline{\rho_L}} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{K_{Lt}}{\overline{\rho_L}} \right) + \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K_{Lt}}{\partial x_3} \right], \quad (17) \\ & - \left(\overline{\rho_L V_1^2} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} - \left(\overline{\rho_L V_1 V_3''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} - \left(\overline{\rho_L V_3 V_1''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \left(\overline{\rho_L V_3^2} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} - E_{Lt} - \left(1 - \frac{\alpha_m C_m}{a_s} \right) (\overline{V_1 F_1''} + \overline{V_3 F_3''}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{V}_1 \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3 \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\nu_{SL} \frac{1}{3} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_{SL} \frac{1}{3} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right) + 2 \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\nu_{SL} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_{SL} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right) \right] + \\
& + C_{\varepsilon 4} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\overline{V_1 V_1''} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\overline{V_1 V_3''} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\overline{V_3 V_3''} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right] \right) - \\
& - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(\left(\overline{V_1 V_1''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \left(\overline{V_1 V_3''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} + \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \left(\overline{V_3 V_3''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} \right) - C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left[\varepsilon_{Lt} - 2 \nu_{SL} \left(\frac{\partial \sqrt{k_{Lt}}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sqrt{k_{Lt}}}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \\
& + C_{\varepsilon 5} \nu_{SL} \frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left\{ \left(\overline{V_1''} \right) \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \right] + \left(\overline{V_1 V_3''} \right) \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \right) + \right. \right. \\
& + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1 \partial x_3} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_3^2} \right) \left. \right] + \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3 \partial x_1} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_3 \partial x_1} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \right] + \left(\overline{V_3''} \right) \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \times \right. \\
& \times \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3 \partial x_1} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_3^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_3 \partial x_1} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_3}{\partial x_3^2} \right) \left. \right] \left. \right\} - 2 \nu_{SL} \left(1 - \alpha_m \frac{C_m}{a_s} \right) \left[\frac{\partial f_1''}{\partial x_1} \frac{\partial V_1''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_1''}{\partial x_3} \frac{\partial V_1''}{\partial x_3} + \frac{\partial f_3''}{\partial x_1} \frac{\partial V_3''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_3''}{\partial x_3} \frac{\partial V_3''}{\partial x_3} \right].
\end{aligned} \tag{18}$$

де $K_{Lt} = \rho_L \tilde{k}_{Lt}$ – кінетична енергія турбулентності несного середовища; $E_{Lt} = \rho_L \tilde{\varepsilon}_{Lt}$ – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; $f_{\varepsilon 2}$ [13] – функція зміни числа Рейнольдса; σ_K , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 4}$, $C_{\varepsilon 5}$ – константи [13]; $\left[\frac{\partial f_1''}{\partial x_1} \frac{\partial V_1''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_1''}{\partial x_3} \frac{\partial V_1''}{\partial x_3} + \frac{\partial f_3''}{\partial x_1} \frac{\partial V_3''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_3''}{\partial x_3} \frac{\partial V_3''}{\partial x_3} \right]$, $(\overline{V_1 F_1''} + \overline{V_3 F_3''})$, – додаткові дисипативні члени, який обумовлений наявністю сил міжфазної взаємодії.

Форма рівнянь переносу пульсаційних характеристик (17-18) придатна як для малих $Re \rightarrow 0$ так і для великих $Re \rightarrow \infty$ значень турбулентного числа Рейнольдса, зміна яких постійно відбувається в придонній області руслового потоку. Вираз для коефіцієнта турбулентної в'язкості має вид

$$\nu_{Lt} = C_{\mu} f_{\mu 1} K_{Lt}^2 / E_{Lt}, \tag{19}$$

де $f_{\mu 1}$ – функція зміни числа Рейнольдса [13].

Для придонного шару функцію можна прийняти як константу $C_{\mu} = 0,03 \div 0,09$ [14].

Алгебраїчні співвідношення для турбулентних напружень отримані на основі припущення про пропорційність їх переносу та енергії турбулентних пульсацій k_{Lt}

- наприклад, для складової нормальних напружень

$$\frac{\overline{V_3''^2}}{k_{Lt}} = \frac{R_{33} + P_{33} - \varepsilon_{Lt33} - \varepsilon_{St33}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{St33}}, \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
& \text{де } R_{33} = R_{33,1} + R_{33,2} + R_{33,1W} + R_{33,2W}; \quad R_{33,1} = -C_{R1} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} - \frac{2}{3} k_{Lt} \right); \\
& R_{33,2} = -\frac{C_{R2} + 8}{11} \left(P_{33} - \frac{2}{3} P \right) - \frac{30C_{R2} - 2}{55} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} 2k_{Lt} \right) - \frac{8C_{R2} - 2}{11} \left(P_{33}^* - \frac{2}{3} P \right); \\
& R_{33,1W} = C_{R1,W} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(-4\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \eta_3 \right) \frac{k_{Lt}^{3/2}}{C_W \varepsilon_{Lt} x_3 \eta_3}; \quad R_{33,2W} = -C_{R2,W} 4R_{33,2} \eta_3 \frac{k_{Lt}^{3/2}}{C_W \varepsilon_{Lt} x_3 \eta_3}; \\
& P_{33}^* = -2 \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} - \left(\overline{V_1 V_3''} + \overline{V_3 V_1''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3}; \quad P_{33} = -2 \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} - \left(\overline{V_1 V_3''} + \overline{V_3 V_1''} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1}; \\
& \varepsilon_{33} = \frac{2}{3} \varepsilon_{Lt} \left[\left(1 - f_s \right) + \frac{3}{2} \frac{\left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} + \overline{V_3 V_1''} \right)}{k_{Lt}} f_s \right]; \quad \varepsilon_{St33}^* = \left(1 - \frac{C_m}{a_s} \alpha_m \right) 2\overline{V_3''} f_3''; \quad \varepsilon_{St33} = \left(1 - \frac{C_m}{a_s} \alpha_m \right) \overline{V_3''} f_3'';
\end{aligned}$$

- наприклад, для складової дотичних напружень

$$\frac{\overline{V_3 V_1''}}{k_{Lt}} = \frac{R_{31} + P_{31} - \varepsilon_{Lt31} - \varepsilon_{St31}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{St31}} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
& R_{31} = R_{31,1} + R_{31,2} + R_{31,1W} + R_{31,2W}; \quad R_{31,1} = -C_{R1} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \overline{V_3 V_1''}; \\
& R_{31,2} = -\frac{C_{R2} + 8}{11} P_{31} - \frac{30C_{R2} - 2}{55} k_{Lt} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \frac{8C_{R2} - 2}{11} P_{31}^*; \\
& R_{31,1W} = -\frac{3}{2} C_{R1,W} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(\eta_1 \left(\overline{V_1^{\overline{\mu}}} + \overline{V_1 V_3''} \right) + \eta_3 \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} + \overline{V_3 V_1''} \right) \right) \frac{k_{Lt}^{3/2}}{C_W \varepsilon_{Lt} x_3 \eta_3}; \\
& R_{31,2W} = -\frac{3}{2} C_{R2,W} \left(\eta_1 (R_{11,2} + R_{13,2}) + \eta_3 (R_{31,2} + R_{33,2}) \right) \frac{k_{Lt}^{3/2}}{C_W \varepsilon_{Lt} x_3 \eta_3}; \\
& P_{13}^* = -\left(\overline{V_1^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} - \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \left(\frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} \right) - \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1}; \quad P_{13} = -\left(\overline{V_1^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \left(\frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} \right) - \left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3}; \\
& \varepsilon_{13} = \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(\left(\overline{V_3^{\overline{\mu}}} \right) + \left(\overline{V_3 V_1''} \right) \right) f_s; \quad \varepsilon_{St31}^* = \left(1 - \frac{C_m}{a_s} \alpha_m \right) \left(\overline{V_3''} f_1'' + \overline{V_1''} f_3'' \right); \quad \varepsilon_{St31} = \left(1 - \frac{C_m}{a_s} \alpha_m \right) \overline{V_1''} f_3'',
\end{aligned}$$

де $P = -\overline{V_1^2} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} - \overline{V_1 V_3''} \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \overline{V_3 V_1''} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} - \overline{V_3^2} \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3}$ – член генерації турбулентної енергії; f_s – емпірична пристінна функція [13]; $R_{ik,1}, R_{ik,2}$ – члени, які визначають взаємодію пульсаційних складових швидкості між собою та взаємодію усереднених напруг тертя з пульсаційними складовими швидкості відповідно; $R_{ik,1W}, R_{ik,2W}$ – функції, які залежать від конфігурації дна потоку, визначають вплив пасмової структури дна в межах розрахункової області [13]; зокрема параметри пасом визначаються через величину $\eta_3 = \cos \frac{\Delta}{L}$, Δ – висота донних форм, L – довжина донних форм, які визначаються в залежності від швидкісної структури потоку, середнього діаметру донних часток [1, 15]; ε_{ik} дисипативний член за рахунок сил міжфазної взаємодії; $C_{R1}, C_{R2}, C_{R1,W}, C_{R2,W}, C_W$ – емпіричні константи [13].

Аналогічні вирази можна отримати для складових $\overline{V_1^2}, \overline{V_1 V_3''}$.

Невідповідність параметрів турбулентного руху часток наносів від аналогічних характеристик несного середовища в рівняннях переносу (2-3), (5-6) в $k - \varepsilon$ моделі (17-18) враховується за рахунок других кореляційних моментів твердої фази. Кореляції, що містяться в зазначених системах рівнянь, визначені на основі методики отримання ейлерового опису кореляцій, пов'язаних з дисперсною фазою, представленої в роботі [8] для системи рівнянь двофазної турбулентної струмини. Наприклад для кореляційних моментів

$$\overline{W_1 V_3''} = \frac{\gamma_{11}^0 \overline{V_1 V_3''}}{\gamma_{11} + \Phi_{13}} + \frac{\gamma_{13}^0 \overline{V_3^2}}{\gamma_{11} + \Phi_{33}}. \quad (22)$$

$$\overline{W_3 V_3''} = \frac{\gamma_{33}^0 \overline{V_3^2}}{\gamma_{33} + \Phi_{33}} + \frac{\gamma_{31}^0 \overline{V_1 V_3''}}{\gamma_{33} + \Phi_{13}}, \quad (23)$$

$$\overline{W_3^2} = \frac{\gamma_{33}^0 \overline{V_3^2}}{\gamma_{33}(\gamma_{33} + \Phi_{33})} + \frac{\gamma_{31}^0 \overline{V_1^2}}{\gamma_{33}(\gamma_{33} + \Phi_{11})} + \frac{2\gamma_{33}^0 \gamma_{31}^0 \overline{V_1 V_3''}}{\gamma_{33}(\gamma_{33} + \Phi_{13})}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \overline{W_1 W_3''} = & \frac{(\gamma_{11}^0 \gamma_{33}^0 + \gamma_{13}^0 \gamma_{31}^0)(\gamma_{11} + \gamma_{33} + 2\Phi_{13}) \overline{V_1 V_3''}}{(\gamma_{11} + \gamma_{33})(\gamma_{11} + \Phi_{13})(\gamma_{33} + \Phi_{13})} + \frac{\gamma_{11}^0 \gamma_{31}^0 (\gamma_{11} + \gamma_{33} + 2\Phi_{11}) \overline{V_1^2}}{(\gamma_{11} + \gamma_{33})(\gamma_{11} + \Phi_{11})(\gamma_{33} + \Phi_{11})} + \\ & + \frac{\gamma_{13}^0 \gamma_{33}^0 (\gamma_{11} + \gamma_{33} + 2\Phi_{33}) \overline{V_3^2}}{(\gamma_{11} + \gamma_{33})(\gamma_{11} + \Phi_{33})(\gamma_{33} + \Phi_{33})}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \overline{\omega_{S2}'' W_3''} = & \frac{\beta_\omega + \beta_{os}}{2(\beta_\omega + \gamma_{33})} \left[- \frac{\gamma_{33}^o (\beta_\omega + \gamma_{33} + 2C_{t1}^* \varphi_{33})}{(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{33})(\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{33})} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} - \frac{\gamma_{31}^o (\beta_\omega + \gamma_{33} + 2C_{t1}^* \varphi_{31})}{(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{31})(\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{31})} \right. \\ & \times \left. \frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} + \frac{\gamma_{31}^o (\beta_\omega + \gamma_{33} + 2C_{t1}^* \varphi_{11})}{(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{11})(\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{11})} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1''}}{\partial x_3} + \frac{\gamma_{33}^o (\beta_\omega + \gamma_{33} + 2C_{t1}^* \varphi_{13})}{(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{13})(\gamma_{33} + C_{t1}^* \varphi_{13})} \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} \right], \end{aligned} \quad (26)$$

$$\overline{\omega_{S2}'' V_3''} = - \frac{(\beta_\omega + \beta_{os})}{2(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{33})} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} + \frac{(\beta_\omega + \beta_{os})}{2(\beta_\omega + C_{t1}^* \varphi_{13})} \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3}, \quad (27)$$

де $\gamma_{11} = \frac{\partial \tilde{W}_1}{\partial x_1} + \gamma_{11}^o$; $\gamma_{33} = \frac{\partial \tilde{W}_3}{\partial x_3} + \gamma_{33}^o$; $\beta_{os} = \frac{(\mu_{SL})_{i,j}^n}{(\rho_{SL})_{i,j}^n} \frac{15\beta_S^* \pi}{2a_S C_{\Phi 1} D^2}$; $C_{t1}^* = 1,48$ [8];

$$\begin{aligned} \gamma_{11}^o &= \alpha_m \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left(\gamma_{D1} + \gamma_{D2} \left(1 + \frac{2}{3} \tilde{U}_r^{-2} \tilde{U}_{r1}^2 \right) \right) - \gamma_L \tilde{U}_r \frac{\tilde{U}_{r3}}{\tilde{U}_{r1}^2} \left(\frac{d\tilde{V}_1}{dx_3} + \tilde{\omega}_{2s} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) \right) \\ \gamma_{13}^o &= \alpha_m \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \frac{2}{3} \gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \tilde{U}_{r1} \tilde{U}_{r3} + \gamma_L \tilde{U}_r \tilde{U}_{r1}^{-1} \left(\frac{d\tilde{V}_1}{dx_3} - \tilde{\omega}_{2s} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) \right) + \gamma_\omega \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \\ \gamma_{33}^o &= \alpha_m \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left(\gamma_{D1} + \gamma_{D2} \left(1 + \frac{2}{3} \tilde{U}_r^{-2} \tilde{U}_{r3}^2 \right) \right), \gamma_{31}^o = \alpha_m \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \frac{2}{3} \gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \tilde{U}_{r3} \tilde{U}_{r1} + \gamma_\omega \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right). \end{aligned}$$

Формули (22 - 27) містять показники затухання ейлеревих часових кореляцій φ_{ij} у фіксованих точках простору. Оскільки в руслових потоках величина пульсації швидкості води менша на два порядки від усередненої швидкості, для отримання φ_{11} можна скористатися гіпотезою Тейлора

$$\varphi_{11} = \frac{c_\beta \sqrt{V_1''^2} + |\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1|}{\Lambda_E}, \quad (28)$$

у вертикальному напрямку можна прийняти [8] як

$$\varphi_{33} = \frac{\left(c_\beta \sqrt{V_1''^2} + |\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1| \right)^2}{\left(c_\beta \sqrt{V_1''^2} + 0,5 |\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1| \right) \Lambda_E}, \quad (29)$$

де $c_\beta = 1,0$.

Ейлерів середній масштаб турбулентних збурень Λ_E можна виразити через масштаб руслової турбулентності за припущенням [8, 15] $\Lambda_E = c_\lambda L_t$, $c_\lambda = 1$. Відповідно, масштаб руслової турбулентності безпосередньо обумовлений пасмовою структурою дна можна визначити в залежності від висоти пасма [1,

15] $L_t = \frac{0,38h\sqrt{\tilde{V}_1^2 + \tilde{V}_3^2}}{U_\tau} \left(1 - \frac{\Delta}{h}\right)$, де h – глибина потоку. Для визначення показника згасання змішаної кореляції φ_{13} можна скористатися емпіричною залежністю $\varphi_{13} = K_\varphi \varphi_{33}$, де $K_\varphi \approx 1,0$.

Отримані вирази для кореляцій твердої фази (22) – (27) дозволяють, шляхом множення пульсаційних складових сил f_i'' на пульсаційні складові швидкостей V_i'' , визначити додаткові дисипативні члени $\overline{V_k'' F_k''}$ та ε_{sik} , які входять в рівняння переносу кінетичної енергії турбулентних пульсацій (17) та в алгебраїчні співвідношення для турбулентних напруг (20) – (21):

$$\overline{V_3'' f_{D3}''} = \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left[(\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) (\overline{V_3''} - \overline{V_3'' W_3''}) + \frac{2}{3} \gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \times \right. \\ \left. \times ((\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z)(\overline{V_3'' V_1''} - \overline{V_3'' W_3''}) + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)^2 (\overline{V_3''} - \overline{V_3'' W_3''})) \right] \quad (30)$$

$$\overline{V_3'' f_{L3}''} = \gamma_L \tilde{U}_r \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{V_1'' V_3''}}{\partial x_3} + \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} \right) - \overline{V_3'' \omega_{2s}''} \right), \quad (31)$$

$$\overline{V_3'' f_{\omega 3}''} = \gamma_\omega \left(\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) (\overline{V_3'' V_1''} - \overline{V_3'' W_1''}) + \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1'' V_3''}}{\partial x_3} \right) - \overline{V_3'' \omega_{2s}''} \right) (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) \right); \quad (32)$$

$$\overline{V_3'' f_{D1}''} = \varphi_{Dt} \varphi_{DS} \left[(\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) (\overline{V_3'' V_1''} - \overline{V_3'' W_1''}) + \frac{2}{3} \gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \times \right. \\ \left. \times ((\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2 (\overline{V_3'' V_1''} - \overline{V_3'' W_1''}) + (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3 + \tilde{W}_z)(\overline{V_3''} - \overline{V_3'' W_3''})) \right] \quad (33)$$

$$\overline{V_3'' f_{L1}''} = \gamma_L \frac{\tilde{U}_r}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \left(\left(\frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left((\overline{V_3''} - \overline{V_3'' W_3''}) - (\overline{V_3'' V_1''} - \overline{V_3'' W_1''}) \frac{(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)}{(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)} \right) + \right. \\ \left. + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3) \left(\frac{\partial \overline{V_1'' V_3''}}{\partial x_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1'' V_3''}}{\partial x_3} \right) - \overline{V_3'' \omega_{2s}''} \right) \right), \quad (34)$$

$$\overline{V_3'' f_{\omega 1}''} = \gamma_\omega \left(\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) (\overline{V_3''} - \overline{V_3'' W_3''}) + \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1'' V_3''}}{\partial x_3} \right) - \overline{V_3'' \omega_{2s}''} \right) (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3) \right), \quad (35)$$

$$\overline{V_k'' F_k''} = \overline{V_k'' f_k''} \cdot \overline{\rho_s} = \overline{\rho_s} (\overline{V_1'' f_{D1}''} + \overline{V_3'' f_{D3}''} + \overline{V_1'' f_{L1}''} + \overline{V_3'' f_{L3}''} + \overline{V_1'' f_{\omega 1}''} + \overline{V_3'' f_{\omega 3}''}). \quad (36)$$

Аналогічно можна отримати вирази для складових $\overline{V_1'' f_{D1}''}, \overline{V_1'' f_{L1}''}, \overline{V_1'' f_{\omega 1}''}, \overline{V_1'' f_{D3}''}, \overline{V_1'' f_{L3}''}, \overline{V_1'' f_{\omega 3}''}$. Вирази для складових дисипативного члена

$\frac{\partial f_i''}{\partial x_j} \frac{\partial V_i''}{\partial x_j}$ рівняння переносу швидкості дисипації енергії турбулентних пульсацій

(18) в системі координат OX_1X_3 представимо у вигляді суми трьох доданків, обумовлених пульсаціями сил міжфазної взаємодії

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial f_{D1}''}{\partial x_1} \frac{\partial V_1''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{D1}''}{\partial x_3} \frac{\partial V_1''}{\partial x_3} + \frac{\partial f_{D3}''}{\partial x_1} \frac{\partial V_3''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{D3}''}{\partial x_3} \frac{\partial V_3''}{\partial x_3} = \varphi_{Dt} \varphi_{Ds} \left[\left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} - \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) \frac{\partial k_{Lt}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) \frac{\partial k_{Lt}}{\partial x_3} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) \left(\frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_1} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\partial}{\partial x_3} (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) \left(\frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_3} \right) \right) \left(\frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} + \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} + \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} + \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) + \right. \\
& \left. + (\gamma_{D1} + \gamma_{D2}) \frac{\varepsilon_{Lt}}{\nu} \left(1 - \frac{1}{3} \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1}''}{k_{Lt}} f_s \right) \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} - \frac{1}{2} \frac{\overline{V_1 V_3}''}{k_{Lt}} f_s \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} - \frac{1}{2} \frac{\overline{V_3 V_1}''}{k_{Lt}} f_s \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{3} \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3}''}{k_{Lt}} f_s \right) \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \overline{V_1}''}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_3}''}{\partial x_1} - \frac{\partial k_{Lt}}{\partial x_1} \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \frac{\partial \overline{V_1}''}{\partial x_1} \left(\frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} + \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) - \frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_1} \left(\frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} + \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \right. \\
& \left. - \frac{\partial \overline{V_3}''}{\partial x_1} \left(\frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} + \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_1} \left(\frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} + \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) \right) \left(\frac{\partial (\gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2})}{\partial x_1} [(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2 + \right. \\
& \left. + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)^2 + 2(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)] + 2\gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \left(\frac{\partial (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)}{\partial x_1} \right) [(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)] \right) + \\
& + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \overline{V_1}''}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{V_3}''}{\partial x_3} - \frac{\partial k_{Lt}}{\partial x_3} \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} - \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \right. \\
& \left. - \frac{\partial \overline{V_1}''}{\partial x_3} \left(\frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} + \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) - \frac{\partial \overline{V_1 V_3}''}{\partial x_3} \left(\frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} + \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \frac{\partial \overline{V_3}''}{\partial x_3} \left(\frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} + \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \right. \\
& \left. - \frac{\partial \overline{V_3 V_1}''}{\partial x_3} \left(\frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} + \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) \right) \left(\frac{\partial (\gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2})}{\partial x_3} [(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2 + 2(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3) + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)^2] + \right. \\
& \left. + 2\gamma_{D2} \tilde{U}_r^{-2} \left(\frac{\partial (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)}{\partial x_3} + \frac{\partial (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)}{\partial x_3} \right) [(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) + (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)] + \frac{\varepsilon_{Lt}}{\nu} \frac{2\gamma_{D2}}{9\tilde{U}_r^2} \left(\left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1}''}{k_{Lt}} f_s \right) \times \right. \right. \\
& \times \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} \right) - \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1 V_3}''}{k_{Lt}} f_s \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} \right) (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)^2 + \left(\frac{3}{2} \frac{\overline{V_1 V_3}''}{k_{Lt}} f_s \left(1 - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1}''}{k_{Lt}} f_s \right) \times \right. \\
& \times \left. \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) (\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1)(\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3) + \left(\frac{3}{2} \frac{\overline{V_3 V_1}''}{k_{Lt}} f_s \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{11}} \right) - \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3}''}{k_{Lt}} f_s \right) \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} \right) \times \\
& \times (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)(\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1) + \left. \left. \left(\left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3}''}{k_{Lt}} f_s \right) \left(1 - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) - \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3 V_1}''}{k_{Lt}} f_s \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) (\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3)^2 \right] \right] \quad (37)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial f''_{L1}}{\partial x_1} \frac{\partial V''_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f''_{L3}}{\partial x_1} \frac{\partial V''_3}{\partial x_1} + \frac{\partial f''_{L1}}{\partial x_3} \frac{\partial V''_1}{\partial x_3} + \frac{\partial f''_{L3}}{\partial x_3} \frac{\partial V''_3}{\partial x_3} = \gamma_L \frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1} \right) \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \right) + \right. \\
& + \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1} \right) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left. \right] \overline{V_3 V_1''} \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_1 \partial x_3} \left(1 - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{11}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3} \right) \times \right. \\
& \times \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) + \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3} \right) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left. \right] \overline{V_3''} \left(1 - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{13}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) \times \\
& \times \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_1 \partial x_3} + \left(\frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1} \right) \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) + \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_1 - \tilde{W}_1} \right) \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \right) \overline{V_3 V_1''} \times \\
& \times \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_3^2} \left(1 - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{11}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3} \right) \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) + \left(\frac{\tilde{U}_r}{\tilde{V}_3 - \tilde{W}_3} \right) \times \right. \\
& \times \left. \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \right) \overline{V_3''} \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_3^2} \left(1 - \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{13}} - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{33}} \right) \left. \right], \tag{38}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial f''_{\omega 1}}{\partial x_1} \frac{\partial V''_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f''_{\omega 3}}{\partial x_1} \frac{\partial V''_3}{\partial x_1} + \frac{\partial f''_{\omega 1}}{\partial x_3} \frac{\partial V''_1}{\partial x_3} + \frac{\partial f''_{\omega 3}}{\partial x_3} \frac{\partial V''_3}{\partial x_3} = \gamma_\omega \frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left(\overline{V_3 V_1''} \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_3 \partial x_1} \times \right. \right. \\
& \times \left(1 - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) + \overline{V_1 V_3''} \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_1^2} \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} \right) - \overline{V_1''} \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_1^2} \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{11}} - \overline{V_3''} \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_3 \partial x_1} \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{33}} \left. \right) + \\
& + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \left(\overline{V_3 V_1''} \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_3^2} \left(1 - \frac{\gamma_{33}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{31}} \right) + \overline{V_1 V_3''} \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_1 \partial x_3} \left(1 - \frac{\gamma_{11}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{13}} \right) - \overline{V_1''} \times \right. \\
& \times \left. \frac{\partial^2 \overline{V_1}}{\partial x_1 \partial x_3} \frac{\gamma_{31}^o}{\gamma_{33} + \varphi_{11}} - \overline{V_3''} \frac{\partial^2 \overline{V_3}}{\partial x_3^2} \frac{\gamma_{13}^o}{\gamma_{11} + \varphi_{33}} \right) \left. \right] + \gamma_\omega \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \tilde{\omega}_{2s} \right) \frac{\varepsilon_{Lt}}{3\nu_L} \left(\frac{3f_s}{2k_{Lt}} \left(\left(1 - \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{33} + C_{t1}\varphi_{31}} \right) \times \right. \right. \\
& \times \overline{V_1 V_3''} + \overline{V_3 V_1''} \left(1 - \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{11} + C_{t1}\varphi_{13}} \right) \left. \right) - \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1''}}{k_{Lt}} f_s \right) \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{33} + C_{t1}\varphi_{11}} - \left(1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3''}}{k_{Lt}} f_s \right) \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{11} + C_{t1}\varphi_{33}} \left. \right]. \tag{39}
\end{aligned}$$

Визначення додаткових ефективних напружень $(\overline{W_3''^2})_{imp}$, ґрунтується на припущенні, що контактна взаємодія часток наносів з дном превалює над силою взаємодії твердих часток між собою. Для визначення залежності для моменту кореляцій твердої фази за вихідні взято вертикальну проекцію рівняння переносу пульсаційної енергії несного середовища та твердої фази [17]

$$\begin{aligned}
& \left(\overline{\rho_s W_3''^2} \right)_{imp} = \left[- \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{C_\mu f_\mu \chi z}{2^{1,5} \sigma_k} \sqrt{\frac{\rho_L V_3''}{\rho_L}} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_3} \right) - \frac{C_D f_s \rho_L V_3''^{1,5}}{2^{1,5} \chi z} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\mu_{SL}}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\rho_L V_3''}{\rho_L} \right) \right] \\
& + \alpha_m \overline{W_3'' F_3''} - \left(1 - \alpha_m \frac{C_m}{a_s} \right) \overline{V_3'' F_3''} \left(\frac{\partial \tilde{W}_3}{\partial x_3} \right)^{-1}, \tag{40}
\end{aligned}$$

де член рівняння $\overline{V_3 F_3''} = \overline{V_3 F_{D3}''} + \overline{V_3 F_{L3}''} + \overline{V_3 F_{\omega 3}''}$ можна представити через складові, аналогічно виразам (30-36); c_D – емпірична константа, χ – постійна Кармана, z – координата, нормальна до дна, яка змінюється в межах придонного шару 10 D часток від дна.

Процеси розвитку деформацій на заплавних ділянках починаються тільки при перевищенні швидкості потоку над нерозмивною для ґрунту, який складає дно; відповідно, залежать від зчіпних якостей ґрунтових часток та від розподілу рослинності, які знижують їх інтенсивність. На поверхні заплав донні наноси виявляються похованими під товщею намулку, відкладених дрібних фракцій, занесених в паводок в зваженому стані. Таким чином рівняння переносу над заплавною частиною повинні враховувати зчіпні якості ґрунтів, наявність зважених наносів та вплив рослинного покриву

$$\overline{\rho_{LS}} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial t} + \overline{\rho_{LS}} \tilde{V}_1 \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \overline{\rho_{LS}} \tilde{V}_3 \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} - \overline{\rho_s} \tilde{W}_z \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\mu_{LS} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial \overline{\rho_{LS} V_1 V_3''}}{\partial x_3} - \tilde{F}_{P1}, \quad (41)$$

$$\overline{\rho_{LS}} \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial t} + \overline{\rho_{LS}} \tilde{V}_1 \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} + \overline{\rho_{LS}} \tilde{V}_3 \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} - \overline{\rho_s} \tilde{W}_z \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_3} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\mu_{LS} \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial \overline{\rho_{LS} V_3''}}{\partial x_3} - \overline{\rho_{LS}} g - \bar{F}_C - \tilde{F}_{P3} \quad (42)$$

де проекції $\tilde{F}_{P1}, \tilde{F}_{P3}$ – сили опору рослинності, $\bar{F}_C$ – сили зчеплення ґрунту.

В якості рівняння збереження маси використовується рівняння

$$\frac{\partial \overline{\rho_{LS}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho_{LS} \tilde{V}_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{\rho_{LS} \tilde{V}_3}}{\partial x_3} - \frac{\partial}{\partial x_3} (\overline{\rho_s} \tilde{W}_z) = 0. \quad (43)$$

Товщина придонного шару на заплаві відповідає або висоті рослинного шару (з малою висотою) або товщині придонного шару в руслі (при великій висоті рослин). Для усереднених складових сили опору отримані залежності, які ґрунтуються на підході з визначення розподіленої сили, що діє в шарі рослин, в системі координат OX_1X_3

$$\tilde{F}_{P1} = \frac{1}{2} \rho_{SL} C_X s_p \left(\tilde{U} \tilde{V}_1 + \tilde{V}_1 \overline{V_1''} \tilde{U}^{-1} + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \overline{V_3 V_1''} \tilde{U}^{-1} \right), \quad (44)$$

$$\tilde{F}_{P3} = \frac{1}{2} \rho_{SL} C_X s_p \left(\tilde{U} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) + \tilde{V}_1 \overline{V_1 V_3''} \tilde{U}^{-1} + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \overline{V_3''} \tilde{U}^{-1} \right), \quad (45)$$

де C_X – коефіцієнт опору рослинності, який визначається за експериментальними дослідженнями, згідно [17]; $s_p = \frac{D_{cm} \Delta z_{cm}}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3}$ – загальна міделева площа рослинності, яка розподілена в певному об'ємі потоку; D_{cm} – діаметр стебла рослини, яка обтікається водою, м; Δz_{cm} – частина стебла рослини за висотою, яка обтікається водою, м; $\tilde{U} = \sqrt{\tilde{V}_1^2 + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right)^2}$ – повна швидкість потоку, .

Враховуючи фізико-хімічну природу взаємодії піщаних, глинистих та болотистих, характерних для дна руслових та заплавних потоків, дрібнозернистих ґрунтів з водою, виникають сили зчеплення молекулярного характеру. Згідно проведених в роботі [18] досліджень, силу опору відриву множини зерен ґрунту можна визначити за залежністю

$$\bar{F}_C = \frac{0,035C \cdot \bar{S}g}{C_{\Phi 1}D}, \quad (46)$$

де $0,035 \cdot C$ – межа втомленості розриву зв'язних ґрунтів; C – зчеплення ґрунту в стані повного водонасичення, кг/см^2 .

Замикаючи рівняння переносу характеристик турбулентного потоку над заплавною частиною в придонній області, як і у випадку для руслового потоку, повинні бути придатними і для малих $Re \rightarrow 0$ і для великих $Re \rightarrow \infty$ чисел Рейнольдса, враховувати наявність зважених транспортних наносів та вплив рослинного покриву:

- к- рівняння

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_{SLt}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{V}_1 K_{SLt}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3 K_{SLt}}{\partial x_3} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_{SL}} \tilde{W}_z K_{SL} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{K_{SLt}}{\rho_{SL}} \right) + \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K_{SLt}}{\partial x_1} \right] - \left(\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \tilde{V}_1'' \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} - \\ - \left(\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \tilde{V}_1 \tilde{V}_3'' \right) \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{K_{SLt}}{\rho_{SL}} \right) + \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K_{SLt}}{\partial x_3} \right] - \left(\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \tilde{V}_3 \tilde{V}_1'' \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_1} - \left(\frac{\mu_{SL}}{\rho_{SL}} \tilde{V}_3'' \right) \frac{\partial \tilde{V}_3}{\partial x_3} - E_{SLt} - \left(\tilde{V}_1'' F_{P1} + \tilde{V}_3'' F_{P3} \right), \end{aligned} \quad (47)$$

- ε- рівняння

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{V}_1 \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tilde{V}_3 \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\nu_{SL} \frac{1}{3} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_{SL} \frac{1}{3} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right) + 2 \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\nu_{SL} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_{SL} \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right) \right] + \\ + C_{\varepsilon 4} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\frac{\tilde{V}_1''}{\tilde{V}_1} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\frac{\tilde{V}_1''}{\tilde{V}_3} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\frac{\tilde{V}_3''}{\tilde{V}_1} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \left(\frac{\tilde{V}_3''}{\tilde{V}_3} \right) \frac{\partial \varepsilon_{Lt}}{\partial x_3} \right] \right) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left(\overline{V_1 V_1''} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_1} + \overline{V_1 V_3''} \frac{\partial \tilde{V}_1}{\partial x_3} + \overline{V_3 V_1''} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) + \overline{V_3 V_3''} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) - \\
& -C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_{Lt}}{k_{Lt}} \left[\varepsilon_{Lt} - 2\nu_{SL} \left(\frac{\partial \sqrt{k_{Lt}}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sqrt{k_{Lt}}}{\partial x_3} \right)^2 \right] - 2\nu_{SL} \left[\frac{\partial f_{P1}''}{\partial x_1} \frac{\partial V_1''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{P1}''}{\partial x_3} \frac{\partial V_1''}{\partial x_3} + \frac{\partial f_{P3}''}{\partial x_1} \frac{\partial V_3''}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{P3}''}{\partial x_3} \frac{\partial V_3''}{\partial x_3} \right] + C_{\varepsilon 5} \nu_{SL} \frac{k_{Lt}}{\varepsilon_{Lt}} \times \\
& \times \left\{ \overline{V_1''} \left[\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} \right) \left(\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \right) \right] + \right. \\
& + \overline{V_1 V_3''} \left[\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \left(\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) + \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \right) \right] + \\
& + \overline{V_3 V_1''} \left[\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3 \partial x_1} \right) \left(\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \right) \right] + \\
& + \overline{V_3''} \left[\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \right) \left(\left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3 \partial x_1} \right) + \left(\frac{\partial^2 \tilde{V}_1}{\partial x_3^2} \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \right) \right) \right] \Big\}, \tag{48}
\end{aligned}$$

- алгебраїчні співвідношення для турбулентних напруг

$$\frac{\overline{V_1''}}{k_{Lt}} = \frac{R_{11} + P_{11} - \varepsilon_{Lt11} - \varepsilon_{Pt11}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{Pt11}}, \quad \varepsilon_{Pt11}^* = 2\overline{V_1'' f_{P1}''}, \quad \varepsilon_{Pt11} = \overline{V_1'' f_{P1}''}, \tag{49}$$

$$\frac{\overline{V_3''}}{k_{Lt}} = \frac{R_{33} + P_{33} - \varepsilon_{Lt33} - \varepsilon_{Pt33}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{Pt33}}, \quad \varepsilon_{Pt33}^* = 2\overline{V_3'' f_{P3}''}, \quad \varepsilon_{Pt33} = \overline{V_3'' f_{P3}''}, \tag{50}$$

$$\frac{\overline{V_1 V_3''}}{k_{Lt}} = \frac{R_{13} + P_{13} - \varepsilon_{Lt13} - \varepsilon_{Pt13}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{Pt13}}, \quad \varepsilon_{Pt13}^* = (\overline{V_1'' f_{P3}''} + \overline{V_3'' f_{P1}''}), \quad \varepsilon_{Pt13} = \overline{V_3'' f_{P1}''}, \tag{51}$$

$$\frac{\overline{V_3 V_1''}}{k_{Lt}} = \frac{R_{31} + P_{31} - \varepsilon_{Lt31} - \varepsilon_{Pt31}^*}{P - \varepsilon_{Lt} - \varepsilon_{Pt31}}, \quad \varepsilon_{Pt31}^* = (\overline{V_3'' f_{P1}''} + \overline{V_1'' f_{P3}''}), \quad \varepsilon_{Pt31} = \overline{V_1'' f_{P3}''}, \tag{52}$$

де додаткові дисипативні члени за рахунок впливу сил опору рослинності для рівнянь (47) та (49-52)

$$\overline{V_1'' f_{P1}''} = \frac{1}{2} \frac{C_X S_p}{\tilde{U}} \left[\tilde{U}^2 \overline{V_1''} + \tilde{V}_1^2 \overline{V_1''} + \tilde{V}_1 \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \overline{V_1 V_3''} \right], \tag{53}$$

$$\overline{V_3'' f_{P3}''} = \frac{1}{2} \frac{C_X S_p}{\tilde{U}} \left[\tilde{U}^2 \overline{V_3''} + \tilde{V}_1 \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right) \overline{V_3 V_1''} + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} \tilde{W}_z \right)^2 \overline{V_3''} \right], \tag{54}$$

$$\overline{V_3'' f_{P1}''} = \frac{1}{2} \frac{C_x S_p}{\tilde{U}} \left[(\tilde{U}^2 + \tilde{V}_1^2) \overline{V_3'' V_1''} + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\overline{\rho_s}}{\rho_{LS}} W_z \right) \tilde{V}_1 \overline{V_3''} \right], \quad (55)$$

$$\overline{V_1'' f_{P3}''} = \frac{1}{2} \frac{C_x S_p}{\tilde{U}} \left[\tilde{V}_1 \left(\tilde{V}_3 - \frac{\overline{\rho_s}}{\rho_{LS}} W_z \right) \overline{V_1''} + \left(\tilde{U}^2 + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\overline{\rho_s}}{\rho_{LS}} W_z \right)^2 \right) \overline{V_1 V_3''} \right], \quad (56)$$

та додаткові дисипативні члени за рахунок впливу сил опору рослинності для рівняння (48)

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{P1}''}{\partial x_1} \frac{\partial \overline{V_1''}}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{P1}''}{\partial x_3} \frac{\partial \overline{V_1''}}{\partial x_3} + \frac{\partial f_{P3}''}{\partial x_1} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{P3}''}{\partial x_3} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_3} = \frac{1}{2} C_x S_p \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_1''}}{\partial x_1} \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\tilde{V}_1^2}{\tilde{U}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_3} \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{1}{\tilde{U}} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} W_z \right)^2 \right] \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_3} \frac{\partial \overline{V_1''}}{\partial x_3} + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_1} \frac{\partial \overline{V_3''}}{\partial x_1} \right) + \frac{\tilde{U} \varepsilon_{SLt}}{\nu_{SL}} + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{\tilde{V}_1}{\tilde{U}} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} W_z \right) \right] \frac{\partial \overline{V_1 V_3''}}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{\tilde{V}_1}{\tilde{U}} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} W_z \right) \right] \frac{\partial \overline{V_3 V_1''}}{\partial x_1} + \left(\tilde{V}_1^2 \left[1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_1''}}{k_{SLt}} f_s \right] + \right. \\ \left. + \frac{3}{2} \frac{\tilde{V}_1}{k_{SLt}} \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} W_z \right) f_s (\overline{V_3 V_1''} + \overline{V_1 V_3''}) + \left(\tilde{V}_3 - \frac{\rho_s}{\rho_{LS}} W_z \right)^2 \left[1 - f_s + \frac{3}{2} \frac{\overline{V_3''}}{k_{SLt}} f_s \right] \right) \frac{\varepsilon_{SLt}}{3 \nu_{SL} \tilde{U}} \left. \right\}. \quad (57) \end{aligned}$$

Для розглянутих у даній роботі процесів розвитку загальних деформацій в зоні впливу мостових переходів, що представлені у виді систем рівнянь параболо-гіперболічного й еліптичного типу розроблено методи реалізації запропонованих математичних моделей, представлених у декартових координатах. Дискретний аналог і алгоритм рішення нестационарних рівнянь моделей зависеного руслового та заплавного потоків (2-3), (5-6), (41-43), $k - \varepsilon$ моделей турбулентності (17-18), (45-48) побудовано на кінцево-різницевому методі предиктор-коректор за явною схемою Мак-Кормака [12, 14].

Рішення стаціонарних рівнянь аналогічно одержанню асимптотично стаціонарного рішення нестационарної задачі. Тому чисельна реалізація співвідношень (20-27), (40), (49-52) проводиться за явним ітераційним методом Гаусса - Зейделя. Для прискорення збіжності будь-якого ітераційного процесу використовується метод послідовної верхньої релаксації (п.в.р.) [12].

Рухливість твердих границь потоку обумовлює необхідність приєднати до складу рівнянь динаміки руслових потоків (1-7) граничну умову, що встановлює зв'язок між змінами русла і транспортуванням наносів. В якості

базового рівняння розрахунку планових деформацій прийняте двовимірне рівняння балансу наносів, яке може бути записане у виді

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\partial q_{S1}}{\partial x_1} + \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\partial q_{S2}}{\partial x_2} = 0, \quad (58)$$

де z_0 – відмітки поверхні дна річкового русла; q_{Si} – питома витрата руслових наносів; ε – коефіцієнт пористості донних відкладень; x_1, x_2 – поздовжня та поперечні координати. Розв’язування представленого рівняння (58) за явною схемою Мак-Кормака запропоновано в роботах [12, 14]. Глибина розмиву заплавної ділянки $h_{\zeta \ddot{a} \ddot{r} . \ddot{r} . \delta}$ визначається на основі співвідношення дійсної та нерозмивної швидкостей

$$h_{\text{зан.п.}} = \frac{h_{\text{зан.}} \beta_{\Pi} \langle U_{SL} \rangle_{i,j}}{(1-\lambda) U_{\text{нерозм}}}, \quad (59)$$

де $\langle U_{SL} \rangle_{i,j}$ – середні за глибиною (на вертикалі) значення швидкості потоку, $\langle U_{SL} \rangle_{i,j} = \frac{1}{h} \int_{z_0}^H \tilde{U} dx_3$; $h_{\text{зан.}}$ – глибина заплави; β_{Π} – степінь стиснення заплавної потоку; λ – відносна ширина опори, $\lambda = B_{\text{pier}}/l_{np}$; B_{pier} – ширина опори; l_{np} – довжина прольоту мосту, $U_{\text{нерозм}}$ – нерозмивна швидкість, м [2, 6].

В якості межових умов на поверхні потоку запропоновано рівняння для відмітки поверхні $H_{\Pi B}$, яке отримано шляхом інтегрування складових рівняння збереження маси (43) по вертикалі від відмітки дна до відмітки поверхні (в ламаних дужках – середні за глибиною значення змінних характеристик потоку)

$$\frac{\partial H_{\Pi B}}{\partial t} + \frac{h}{\langle \rho_{LS} \rangle} \frac{\partial \langle \rho_{LS} \rangle}{\partial t} + \frac{h}{\langle \rho_{LS} \rangle} \frac{\partial \langle \rho_{LS} \tilde{V}_1 \rangle}{\partial x_1} + \langle \tilde{V}_1 \rangle_i \frac{\partial h}{\partial x_1} - \frac{(\overline{\rho_S W_z})_{i,H_{\Pi B}}}{\langle \rho_{LS} \rangle} = 0, \quad (60)$$

де величина добутку $(\overline{\rho_S W_z})_{i,H_{\Pi B}}$ визначаються на поверхні потоку.

На основі представлених у статті математичних моделей для придонної області в комплексі з математичними моделями для основної товщі зависеного річного потоку, які наведені у роботі [19], та методів їх реалізації було розроблено програмний комплекс „Virtual model river 2”. Програмний комплекс складається з семи блоків: розрахунок початкових та межових умов,

реалізація дискретних аналогів рівнянь переносу в основній товщі зависеного потоку, як в руслі так і на заплавах ділянках, в придонній області в руслі, на заплаві, розрахунок форми вільної поверхні, загальних деформацій або загальних та місцевих деформацій в руслі та на заплаві.

За відомим ходом повені та закономірністю руслової витрати при певному горизонті води (графіки представлено у роботі [20]) було проведено розрахунок загального розмиву підмостового русла на р. Гірський Тікич за відповідно розробленої програмою „Virtual model river 2”. Найвищий рівень весняної повені (висотою 0,3-1,5 м під час звичайної повені та 0,5-2,5 м під час виключно високої повені) спостерігається в другій декаді березня, через 2-3 тижні після його початку.

Для того, щоб розрахувати очікувані деформації русла, що обумовлені зсувом руслових форм, необхідно побудувати модель ділянки річки в зоні впливу мостового переходу за визначеними, в результаті геодезичних вишукувань, відмітками, як правило це відмітки на морфорстворах (рис. 1). Сходинки вихідного гідрографу паводку замінюються графіком зі сходинок, які відповідають розрахунковому кроку Δt програми, що дозволяє проводити розрахунок в умовах, близьких до реальних.

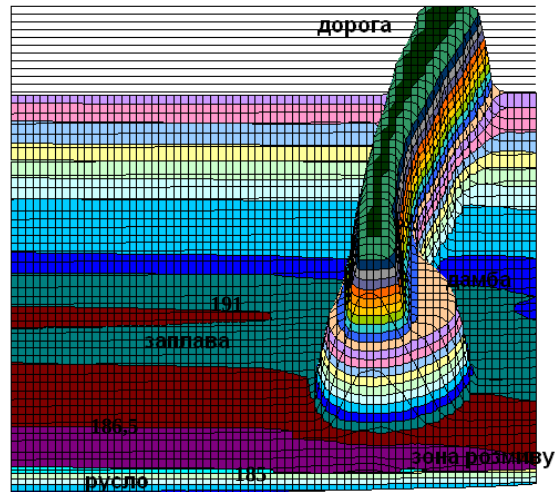


Рисунок 1 – Схема мостового переходу через р. Гірський Тікич на ділянці автомобільної дороги Київ – Одеса, між селами Бузівка і Нестерівка.

Ширина русла річки передбачається змінною, оскільки за рахунок процесу глибинної ерозії та утворенню осередків може виникати розширення русла. На рис. 2 представлено результати розрахунку загального розмиву на двох сходинок паводку, 615-а сходинка паводку розраховувалась за 1% - ю витратою.

Активні деформаційні процеси в річному руслі проходять після 615-ї розрахункової сходинки гідрографа повені. Збільшення витрат води, що протікає по русловій та заплавної ділянках отвору моста, супроводжується зростанням швидкостей течії. Внаслідок чого відбувається посилене винесення частинок ґрунту; тобто – розмив: переважно в руслі і на правій заплаві річки.

Згідно представленим результатам розрахунку загальних деформацій підмостового русла р. Гірський Тікич, як і у більшій кількості випадків у зонах впливу реальних мостових переходів, розмив русла зупиняється лише на спаді повені, оскільки транспортуюча здатність потоку знижується по мірі збільшення розмивних вирв перед та під мостовим переходом. Найглибша відмітка ями розмиву в руслі складає 178 м, осередку – 190 м. Таким чином, можливість встановлення найбільшої глибини безпосередньо біля опори повинна враховуватися для опор, розміщених в руслі річки. Заплави під мостом заросли очеретом та травою і паводковий потік майже не руйнує дерновий покрив. Відповідно руслові зміни на мостовому переході пов'язані з утрудненням водотоку підходами до мосту і тому виражаються, перш за все, в зростанні глибин в руслі.

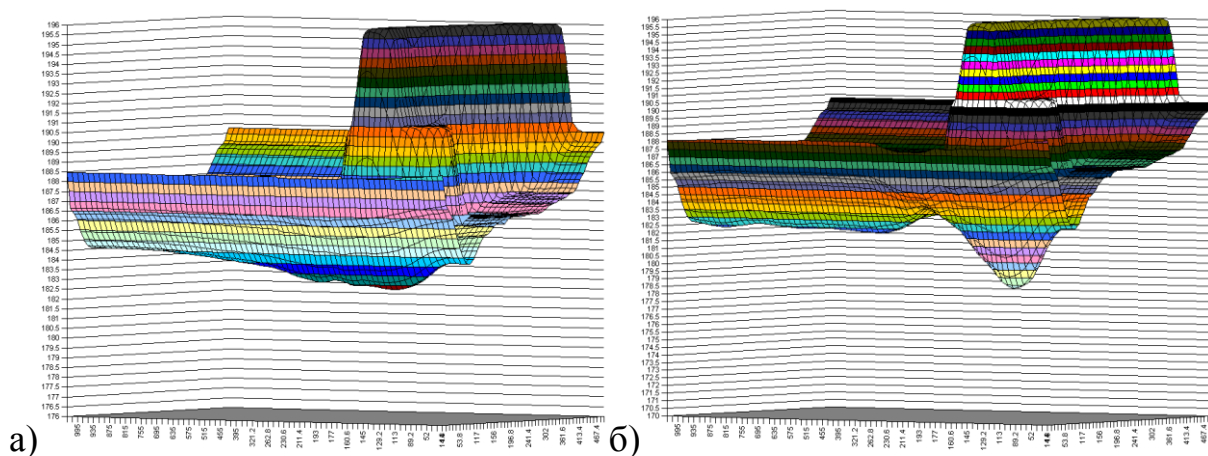


Рисунок 2 – Розрахунок загального розмиву підмостового русла р. Гірський Тікич: а) з витратою $Q=223,28 \text{ м}^3/\text{с}$ після 185-ї сходинки гідрографа повені; б) з витратою $Q=578 \text{ м}^3/\text{с}$ після 615-ї сходинки гідрографа повені.

Реальні природні потоки відрізняються різновидами форм та обмеженими розмірами русла. Під їх впливом утворюється складний просторовий розподіл поздовжніх складових швидкостей. Виникає необхідність в дослідженні локальних характеристик та деталей структури потоку - розподілу швидкостей по перетину, пульсаційних рухів турбулентності з врахуванням її складного анізотропного характеру. На рис. 3 представлено розподіл у придонній області

поздовжньої швидкості $\tilde{V}_1$ в створі мостового переходу Значення $\tilde{V}_1$ отримані шляхом реалізації дискретних аналогів рівнянь (5) та (41).

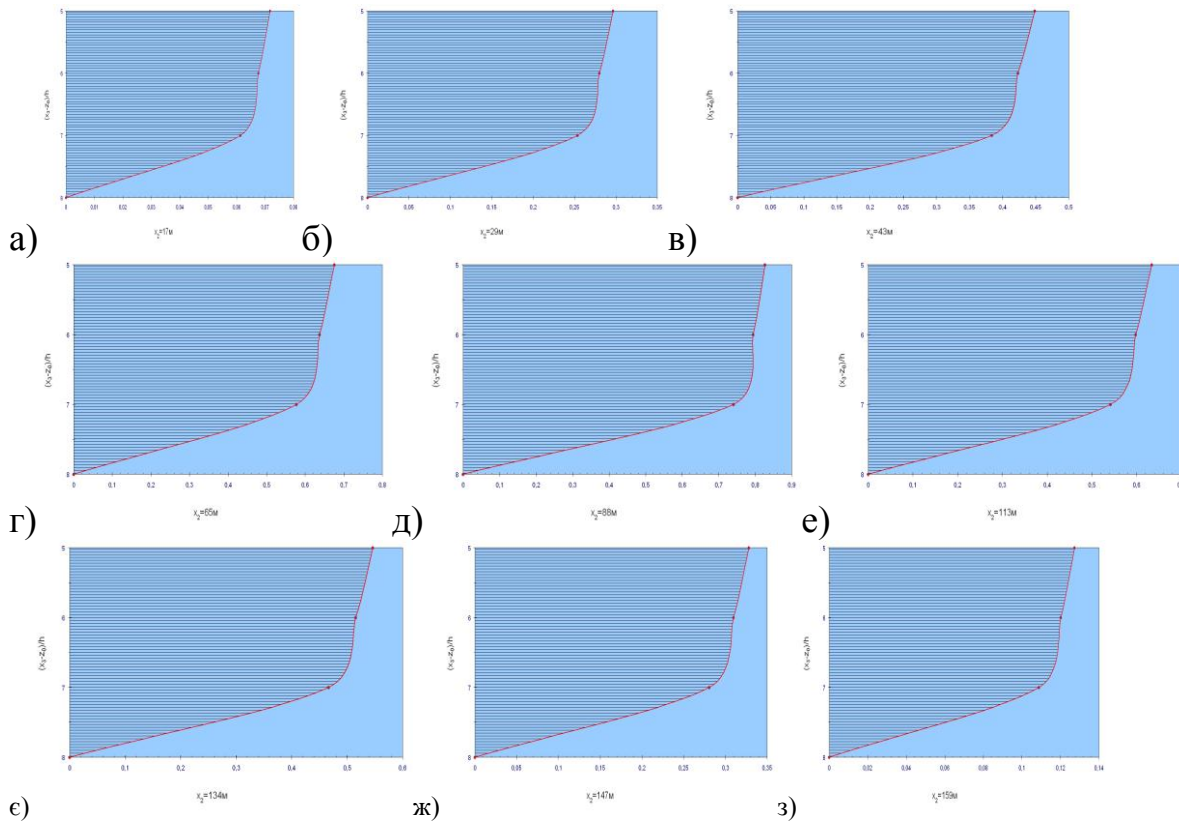


Рисунок 3 – Епюри розподілу поздовжньої швидкості $\tilde{V}_1$ (м/с) у придонній області після 615-ї сходинки гідрографа повені р. Гірський Тікич: а - в – на заплаві; г - є – в руслі; ж, з – на заплаві з насипом підходу.

На основі розв’язку рівнянь (17-18) та (47-48) отримано розподіл у придонному шарі кінетичної енергії турбулентності K_{Lt} та швидкості її дисипації ε_{Lt} . Розподіл мутності $\bar{S}$ у річковому потоці отримано з розв’язку рівнянь (4), (43). Величини K_{Lt} , ε_{Lt} та $\bar{S}$ приймають максимальні значення в зоні розвитку розмиву під мостовим переходом (рис. 4 а, б, в). Також на рис. 4 (г, д, є) представлено розраховані характеристики для твердої фази неоднорідного річкового потоку: швидкості поздовжня і вертикальна $\tilde{W}_1, \tilde{W}_3$, додаткові ефективні напруження $\left(\overline{W_3''^2}\right)_{imp}$ за рахунок контактної взаємодії частинок наносів з дном. У зоні розвитку розмивної вирви швидкості приймають найбільше значення $\tilde{W}_1, \tilde{W}_3$, $\left(\overline{W_3''^2}\right)_{imp}$ - приймає додатне значення, а навколо ями розмиву у руслі – від’ємне. Значення напружень обумовлене інерційністю твердих частинок по відношенню до рідких об’ємів, які

захоплюють їх у процесі пульсаційного та усередненого руху. Цей член описує взаємне перетворення енергії усередненого та пульсаційного руху. Вираз для $(\overline{W_3''^2})_{imp}$ дозволяє зробити важливий висновок, що у зависенесному потоці, на відміну від однорідного спостерігається додаткова генерація турбулентної енергії за рахунок обтікання твердих частинок несної рідиною.

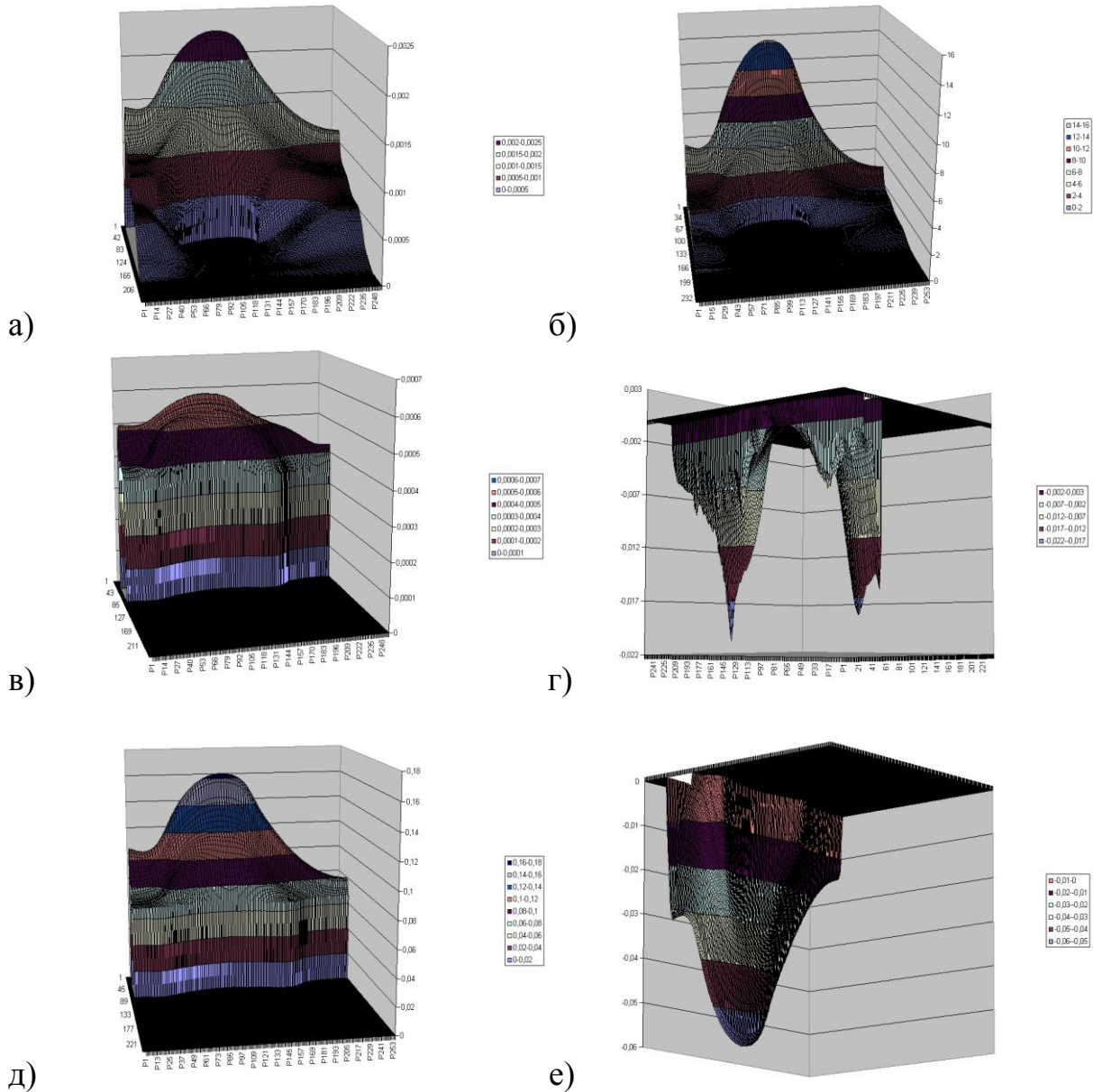


Рисунок 4 – Графіки розподілу гідродинамічних характеристик р. Гірський Тікич у придонному шарі після 615-ї сходинки гідрографа повені: а) кінетичної енергії турбулентності K_{Lt} ($\text{кг/м}^3 \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$); б) швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій ε_{Lt} ($\text{м}^2/\text{с}^3$); в) придонної мутності $\bar{S}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$); г) додаткових ефективних напружень $(\overline{W_3''^2})_{imp}$ ($\text{м}^2/\text{с}^2$) за рахунок контактної взаємодії частинок наносів з дном; д) поздовжньої швидкості $\tilde{W}_1$ (м/с) частинок наносів; е) вертикальної швидкості $\tilde{W}_3$ (м/с) частинок наносів.

Висновки. Запропонований у роботі підхід дозволяє проаналізувати зазначене явище взаємної керованості потоку та русла і заплави в цілому. Таким чином, автором розроблено якісно нові методи прогнозу деформацій в зоні впливу мостових переходів на основі теорії неоднорідних потоків, які враховують особливості протікання турбулентних потоків в цих зонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гришанин К.В.* Динамика руслових потоків. – 2-е изд.Л.:Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.
2. *Романовский В.В.* Исследование начальной скорости влечения частиц наносов. – «Труды ГГИ», 1974, вып. 210, с. 130-150.
3. *Россинский К.И., Дебольский В.К.* Речные наносы. М.: Наука, 1980. 218 с.
4. *Van Rijn L.C.* Sediment transport. Pt 1:Bed load transport//J. Hydr. Ene-1984.- Vol.IIО.Nr 10.-P.1431-1456.
5. *Van Rijn L.C.* Sediment transport. Pt II: suspended load transport//J Hydr Eng.-1984.- Vol.IIО.Nr 11.-P.1613-1641.
6. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 272с.
7. *Лятхер В.М., Гурин И.Н.* Гидравлические характеристики потоков над поверхностью, покрытой травянистой растительностью // Водные ресурсы, 1978, №3. С. 159 – 168.
8. *Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П.* Турбулентные течения газозвеси. – К.: Наук. думка, 1987. - 240 с.
9. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978.- 336 с.
10. *Кріль С.І.* До питання про реологічне моделювання суспензій. – Прикладна гідромеханіка, 2003, том 5 (77), №2. С. 20-26.
11. *Гришин Н.Н.* Механика придонных наносов. – м.: Наука, 1982. – 160 с.
12. *Андерсон Д. Таннехилл Дж. Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - М.: "Мир", 1990. - Т. 1,2. - 725с.
13. *Белов И.А.* Модели турбулентности.: Учебное пособие. 2-е. изд., перераб. и доп. - Л.: ЛМИ, 1986. - 100 с.
14. *Савенко В.Я., Славинская Е.С.* Моделирование процессов развития внутренних течений с учетом анизотропии открытых турбулентных потоков. – К.:НТУ, 2004. – 176 с.
15. *Никитин И.К.* Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса. – К.:Наук. Думка, 1980. – 240 с.
16. *Кріль С.И.* Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. - 160 с.
17. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1969. - 742с.
18. *Мицхулава Ц.Е.* Размыв русел и методика оценки их устойчивости. – М.: Изд-во «Колос», 1967. – 179 с.
19. *Славінська О.С.* Моделювання гідродинамічних процесів у відкритих зависенесучих потоках/ Олена Славінська // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне, 2007. – Ч.2. – Вип. 4(40). – С. 141 – 153.
20. *Славінська О.С.* Дослідження розвитку загальних руслових деформацій в зоні впливу мостового переходу / Олена Славінська // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К.: НТУ, 2008. – Вип. 75. – С. 286 – 295.

Скрипник Т.В., к.т.н.

Малько М.М., к.т.н.

Скрипник В.Ю.

ДОЦІЛЬНІСТЬ АРМУВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ГЕОСИНТЕТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Анотація. Виконано аналіз доцільності армування земляного полотна геосинтетичними матеріалами.

Ключові слова: геосітка, земляне полотно

Аннотация. Выполнено анализ целесообразности армирования земляного полотна геосинтетических материалов.

Ключевые слова: геосетка, земляное полотно.

Abstract. Analysis of the feasibility of subgrade reinforcement geosynthetics.

Keywords: geonet, subgrade.

Актуальність роботи. Будівництво автомобільних доріг часто доводиться здійснювати в складних ґрунтово-гідрологічних умовах та на підроблювальних територіях. Зведення земляного полотна на належному рівні вимагає поряд з удосконаленням традиційних підходів, пошуку нових технічних рішень.

Поміж актуальних завдань технічного прогресу в дорожньому будівництві велике значення має створення технологій, що ґрунтуються на застосуванні нових матеріалів при спорудженні земляного полотна, міцність і стійкість якого обумовлюють головні транспортно-експлуатаційні параметри автомобільної дороги – довговічність і рівність. Від обсягу земляних робіт значною мірою залежить тривалість будівництва дороги. Прикладом реалізації цього напрямку в дорожньому будівництві є застосування конструкцій з армованого геотекстилем ґрунту, які позбавлені багатьох недоліків традиційних проектних рішень і уможливають використання ґрунтів зі зниженими фізико-механічними характеристиками або з підвищеною вологістю, підвищують стійкість земляного полотна на підроблених територіях, спорудження високих

насипів з укосами підвищеної крутості та виконання ряду інших нестандартних завдань.

Основна частина. Проблема підвищення стійкості насипу шляхом армування ґрунтів земляного полотна довгий час не розвивалась через відсутність відповідного матеріалу.

По даним Міжнародної дослідницької організації Batelle Memorial Institute виробництво геосинтетики у світі за останні 20 років виросло на порядок. У наш час випускається приблизно 380 різних видів геосинтетических матеріалів.

Про високу ефективність застосування синтетичних полімерних прошарків і сіток свідчать високі темпи збільшення об'єму їх виробництва та використання. Рисунок 1.1.

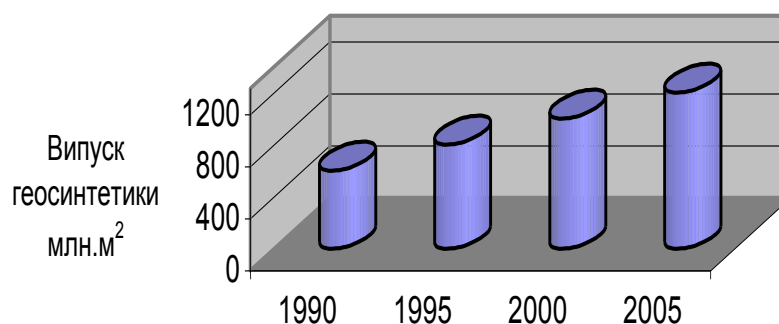


Рисунок 1.1 – Об'єми росту виробництва геосинтетичних матеріалів

Свідченням розповсюдження технологій, що ґрунтуються на застосуванні армованих конструкцій, є те, що за кордоном, особливо в США, будівництво більшості серйозних земляних споруд на автомобільних дорогах нині не обходиться без геотекстильних прошарків.

Відоме також використання геотекстильних прошарків при будівництві доріг у північних та інших областях Росії. Їх застосування ґрунтується на результатах досліджень багатьох науково-дослідних організацій, провідними з яких є СоюздорНДІ, РосдорНДІ, Московський автомобільно-дорожній технічний університет.

Використання геосинтетичних матеріалів регулюється прийнятими нормативними документами різних держав:

- в Україні – Рекомендаціями по застосуванню геосинтетичних матеріалів при будівництві та ремонті автомобільних доріг. РВ.3.2-218-02070915-496:2005.
- в Республіці Беларусь - Стандартом Республики Беларусь СТБ 1104-98. "Полотно иглопробивное для транспортного строительства".
- в Російській Федерації - Техническими условиями РФ. ТУ 218 – РФ – 001 – 05204776 – 01. «Полотно нетканое иглопробивное геотекстильное для строительства» та Техническими условиями РФ. ТУ 8397 – 001 – 05204776 – 01. «Полотно нетканое иглопробивное геотекстильное для строительства».

Найпоширенішим видом сировини для виготовлення геосинтетичного матеріала дорожнього призначення є поліефір. Потрібно обмежувати застосування поліамідних геосинтетичних матеріалів у кислих середовищах ($\text{pH} < 5,5$), поліпропіленових в умовах тривалої дії значного за величиною навантаження, поліефірних на контакті з шарами, що містять вапно або цемент. Таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристика сировини геосинтетичних матеріалів

Показники	Сировина		
	Поліефір	Поліамід	Поліпропілен
Водостійкість	Добра	Зменшення міцності на величину до 30 % при зволоженні	Добра
Біостійкість	Добра	Добра	Добра
Стійкість до дії кислот та лугів в умовах експлуатації	Зменшення міцності у лужному середовищі (гідроокис кальцію)	Зменшення міцності при pH середовища менше 5.5	Добра
Стійкість до сонячної радіації	Добра	Погана	Погана
Механічні властивості волокон	Добрі	Добрі	Недостатня стійкість у часі

Вивчаючи ринок геотекстиля, різні провідні науково-дослідні і проектні інститути Росії, такі як Союздорнді, Росдорнді, ЦНИИС і інші встановили, якими міцністними властивостями повинно володіти полотно геотекстиля.

Полотно геотекстиля для армування земляного полотна й основ автомобільних доріг повинне мати інтегральну міцність на розрив на рівні 40-80 кН/м (4-8 тН/м), а відносне подовження при цьому 10-20%, тим самим забезпечується його схоронність при будівельно-монтажних роботах і в подальшій тривалій експлуатації. Таблиця 1.2.

Таблиця 1.2 – Вимоги до властивостей геосинтетичних матеріалів при попередній оцінці

№п /п	Область застосування, функціональне призначення	Показники				
		R_p , кН/м	ε , %	E_d , кН/м	E_{np} , кН/м	K_f , м/добу
1	Активна зона земляного полотна та нижні шари дорожніх одягів: <i>Капітальні</i> : армування дренування і захист <i>Перехідні і нижчі</i> : армування захист	≥ 5	$< 30^*$	≥ 35	≥ 45	–
		≥ 4	$< 70^*$	$\geq 10^*$	$\geq 15^*$	≥ 100
		≥ 5	$< 50^*$	≥ 25	≥ 35	–
		≥ 4	$< 70^*$	≥ 10	≥ 15	$\geq 20^*$
2	Узбіччя: армування і захист дренування і захист	≥ 5	$< 70^*$	≥ 25	≥ 35	–
		≥ 4	$< 70^*$	$\geq 10^*$	$\geq 15^*$	≥ 100
3	Слабкі основи насипів: армування і захист дренування і захист	≥ 7	< 50	≥ 15	–	20^*
		≥ 5	≤ 70	$\geq 10^*$	–	≥ 100
4	Укоси: армування захист	≥ 10	< 50	≥ 30	≥ 40	–
		≥ 3	< 50	≥ 10	≥ 15	20^*
5	Земляне полотно з ґрунтів підвищеної вологості: дренування і захист	≥ 3	≤ 70	≥ 10	≥ 15	≥ 100
6	Траншейний дренаж	≥ 3	$> 30^*$	–	–	≥ 50
7	Тимчасові дороги на слабких основах, армування і захист	≥ 6	≤ 70	≥ 10	–	≥ 40
		≥ 6	≤ 70	≥ 10	–	≥ 40

Примітки: 1. У таблиці наведені показники СМ на момент їх виготовлення.
2. Показники, відмічені знаком “*” є найбільш прийнятними значеннями; знак (–) означає, що показник не нормується.
3. Значення показників по графах 3–6 надані для випробувань СМ за методикою лінійного розтягування (додаток А). Їх відхилення в меншу сторону в анізотропних СМ дозволяється тільки у випадку застосування цих СМ при армуванні укосів і у напрямі, нормальному дії розтягуючих напружень.

Армувальна здатність геотекстилю проявляється завдяки його опору розтягові та взаємодії прошарку з сусідніми шарами. Розтяг геотекстилю в ґрунті різко знижується порівняно з деформативністю у вільному стані, що залежить від ступеня дисперсності ґрунту, його повзучості, кута внутрішнього тертя, а також від типу геотекстилю, його товщини та структури волокон.

Дослідженням роботи армогрунтових споруд, їх моделюванню і розрахункам, а також удосконаленню методик проектування та питанням технології влаштування конструкції нині приділяється значна увага [1,2]. Для оцінки стійкості армованих масивів часто використовують розрахункову схему з круглоциліндричною поверхнею ковзання. При цьому виходять з припущення, що в разі порівняно розтяжного геотекстилю введення прошарків у роботу відбувається лише за великої деформації зсуву, яка відповідає позамежному стану укусу і поверхні ковзання, що сформувалась без впливу прошарку. До уваги не береться зміна напруженого стану в масиві, взаємодія прошарків зі стійкими та нестійкими блоками, зміна початкової поверхні ковзання, тобто на розрахункову схему круглого циліндра накладається робота прошарків [3].

Зрозуміло, що синтетичний текстильний матеріал здатний змінити характер напруженого стану до досягнення граничної рівноваги, тому перспективним напрямком у розрахунках армогрунтових споруд є використання методу скінчених елементів. Особлива увага приділяється правильному моделюванню умов на контакті геотекстилю з ґрунтом, вибору моделі шарового масиву тощо [1,4].

При застосуванні геотекстилю в дорожньому будівництві важливе місце займають питання економічного обґрунтування проектів наприклад, внаслідок скорочення обсягів земляних робіт, звуження смуги відведення, зменшення довжини водопропускних труб, використання місцевих некондиційних ґрунтів.

Доцільність застосування земляного полотна з прошарками із геосинтетичних матеріалів можливо оцінити шляхом їх техніко-економічного порівняння з традиційними конструктивними рішеннями. При цьому економію слід поділити на пряму і непряму. До прямої економії буде належати: зменшення об'ємів щебеню і вийнятого ґрунту, зниження вартості заповнення виробки тощо, до непрямої – зниження витрат на експлуатацію і підвищення терміну служби дороги, розширення сезону будівельних робіт (можливість будівництва при поганій погоді), поліпшення якості будівельних матеріалів і техніки, скорочення тривалості будівництва та ін.

Зрозуміло, що навіть за відсутності прямої непряма економія може бути значною. Тому економію слід розраховувати за весь період експлуатації доріг.

Часто при значних прямих затратах непряма економія компенсує їх з надлишком. Проведені в НТУ дослідження свідчать, що влаштування армованого геотекстилем земляного полотна на слабкій основі з пошаровим відсипанням ґрунту насипу дає значний економічний ефект, оскільки відпадає потреба видалення слабого ґрунту, а для спорудження насипу об'єм ґрунту зменшується до 30 %.

Слід звернути увагу на такий аспект, як економія транспортних витрат, тобто зниження вартості транспортування геотекстилю внаслідок його незначної маси. При влаштуванні фільтраційного шару геотекстиль масою 250 г/м може замінити зернистий шар завтовшки 15 см масою 250 кг/м (в 1000 разів більше). Якщо взяти 1 км дороги завширшки 8 м, то потреба в щебені становитиме 2000 т, що потребує 200 рейсів автомобіля по 10 т щебеню за кожен рейс, або 2 т геотекстилю (один рейс автомобіля).

Використання геотекстилю може дати значну економію витрат на транспортування матеріалів, які доводиться завозити з інших місцевостей, віддалених на значні відстані від місця виконання дорожніх робіт.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Петрович В. В.* Удосконалення методики проектування автодорожніх насипів на слабких ґрунтах: Дис. ... канд. техн. наук.— К.: УТУ, 1995.— 322 с.
2. *Павлюк Д. А.* Совершенствование методики проектирования армированных насыпей на основе использования математических моделей взаимодействия геотекстильной прослойки с ґрунтом: Дис. ... канд. техн. наук.— К.: КАДИ, 1993.— 316 с.
3. *Полуновский А. Г.* О некоторых проблемах применения геотекстильных материалов // Применение геотекстиля и геопластиков в дорожном строительстве.— М.: СоюздорНИИ, 1990.— С. 8–14.
4. Учет взаимодействия геотекстиля с ґрунтом в расчетах армированных систем «насыпь – основание» / *В. И. Заворицкий, В. И. Швыд, В. В. Петрович и др.* // Материалы международной науч.-техн. конференции «Совершенствование транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог». Ч. 2.— Минск: Белорус. гос. политехн. акад., 1996.— С. 35–40.

Осяєв Ю.М., к.т.н., Малько М.М., к.т.н., Яремов А.П.

УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ АРМОВАНИХ УКОСІВ НАСИПІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Актуальність. Забезпечення стійкості укосів земляного полотна, при постійному збільшенні навантаження і зміни умов роботи земляних споруд, є дуже важливою проблемою. Армування укосів земляного полотна не завжди забезпечує достатню міцність та стійкість укосів. Існуючі методи розрахунку армованих укосів земляного полотна в значній мірі носять наближений характер, тому що у своїй більшості не повно враховують особливості роботи армуючого прошарку в ґрунті, його деформативні властивості тощо.

Аналіз публікацій. Практично в усіх відомих розробках у цьому напрямку розміщення прошарків по висоті укосу приймається фіксованим із постійним кроком. Розрахунок орієнтований лише на визначення ступеня міцності конкретної конструкції без вирішення задачі про найбільш доцільне розміщення прошарків, рівномірного розподілу зсувних навантажень на кожний з прошарків з урахуванням деформативних властивостей армуючого матеріалу. При цьому не розглядається задача визначення оптимальної (мінімально необхідної) кількості шарів армування, оптимального місця розташування їх у тілі земляного полотна.

Основою оцінки стійкості укосів насипів автомобільних доріг є зіставлення їх дійсного розрахункового напруженого стану з граничним можливим. В основу сучасних інженерних методів оцінки стійкості споруд покладено поняття про коефіцієнт запасу стійкості, який в загальному випадку можна представити у вигляді

$$K_{\text{зап}} = \frac{R}{R_d}, \quad (1)$$

де R – узагальнений реактивний граничний опір ґрунту дії граничного навантаження;

R_d – реакція масиву ґрунту на навантаження, що діє.

Таким чином, $K_{\text{зап}}$ має певний фізичний сенс і показує, якою мірою використаний можливий граничний опір ґрунту. Вельми істотно, що при цьому

зіставляються лише однакові за природою реактивні сили – граничні і такі, що діють.

Крім того, повинна виконуватися умова рівноваги

$$R_{\ddot{a}} - \ddot{A} = 0, \quad (2)$$

де A – «узагальнена» активна сила, відповідна розглянутому (дійсному) стану ґрунтового масиву.

Спільне вирішення рівняння фізичного поняття про коефіцієнт запасу стійкості (1) і рівняння рівноваги (2) наводить до вираження для $\kappa_{\text{зап}}$ у вигляді

$$\kappa_{\text{зап}} = \frac{R}{A}. \quad (3)$$

Можна визначати $\kappa_{\text{зап}}$ виходячи із співвідношень

$$\kappa_{\text{зап}} = \frac{T_{\text{п.р.}}}{T_{\text{д.р.}}} \text{ або } \kappa_{\text{зап}} = \frac{M_{\text{п.р.}}}{M_{\text{д.р.}}} \quad (4)$$

де $T_{\text{п.р.}}$ і $M_{\text{п.р.}}$ – сума проекцій або моментів всіх реактивних сил в граничному стані;

$T_{\text{д.р.}}$ і $M_{\text{д.р.}}$ – сума проекцій або моментів реактивних сил, що діють.

Підрозділяти сили на тих, що утримують і зрушують не слідуює. Необхідно використовувати лише розділення всіх сил на активні і реактивні, а останні, у свою чергу, на граничні і ті, що діють.

При введенні посилюючого елемента в ґрунт, прикладення вертикального навантаження викликає деформацію елемента ґрунту і подовження посилюючого елемента. Подовження створює зусилля в елементі посилення, що, у свою чергу, викликає горизонтальне напруження. Це напруження, що обмежує рухливість часток ґрунту, значно підвищує опір горизонтальним силам і зменшує горизонтальні деформації.

Отже, включення геотекстильного прошарку в масив ґрунту зменшує напруження і зусилля, що виникають у ґрунті; з іншого боку, вертикальне навантаження, що прикладається до масиву ґрунту, може бути підвищене, у порівнянні з не посиленим ґрунтом з еквівалентними значеннями деформацій.

Укіс дорожнього насипу є одним з основних елементів інженерної споруди, стійкість якого повинна бути оцінена за допомогою розрахунків не тільки якісно, але і кількісно. Основний параметр проектного укосу – кут його закладення при визначеній висоті укосу.

Існуючі методи розрахунку укосів земляних споруд складаються, як правило, із двох етапів. На першому етапі перевіряють стійкість неармованого укосу. Якщо розрахунковий коефіцієнт стійкості ($K_{\text{зап}}$) більше необхідного ($K_{\text{потр}}$), то армування не призначають. Якщо $K_{\text{зап}}$ менше $K_{\text{потр}}$, то на другому етапі проводять аналіз місця розташування критичної поверхні зсуву і призначають армування, не змінюючи при цьому геометричних параметрів насипу. Однак при введенні в масив насипу армуючих прошарків, можна визначити оптимальний кут закладення укосів.

У нестійких укосах, що характеризуються однорідним складом, порушення стійкості відбувається по найбільш слабких поверхнях ковзання, що утворюються безпосередньо в момент порушення стійкої рівноваги укосу.

Розрахункову поверхню ковзання можна побудувати в нестійкому масиві, припускаючи, що даний укіс знаходиться в стані граничної рівноваги. Відповідно до положень статички сипучого середовища в укосах з однорідним складом, площадки ковзання в будь-якій крапці нахилені до найбільшого головного напруження під кутом $45^\circ - \varphi/2$ і виникають при напруженнях

$$\sigma_0 = 2c \cdot \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (5)$$

де c – зчеплення ґрунту;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

З формули (5) видно, що площадки ковзання виникають, лише починаючи з глибини

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (6)$$

де γ – об'ємна вага ґрунту.

У масиві ґрунту найбільші головні напруження, віддалені від укосу, спрямовані вертикально, а в міру наближення до укосу спрямовуються убік укосу і на поверхні увігнутих і плоских укосів збігаються з ним. Зі зміною напрямку дії найбільших головних напружень від 90° до α (α – кут закладення укосу) змінюється і напрямок площадок ковзання. Однак кут нахилу їх до

найбільших головних напружень залишається постійним, рівним $45^\circ - \varphi/2$. Знаючи напрямки найбільших головних напружень у кожній крапці деякої області, можна побудувати загальну поверхню ковзання в гранично напруженому укосі.

Рішення задачі визначення положення поверхні ковзання значно спрощується, якщо звернутися спочатку до випадку вертикального укосу ($\alpha = 90^\circ$), а потім поширити отриманий результат на загальний випадок ($\alpha \neq 90^\circ$).

При вертикальному укосі напрямок σ_1 залишається постійним. Тому що площадки ковзання завжди нахилені до напрямку σ_1 під кутом $45^\circ - \varphi/2$, загальна поверхня ковзання буде плоскою, а кут нахилу її до обрію

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{90^\circ + \varphi}{2}. \quad (7)$$

Переходячи тепер до загального випадку ($\alpha \neq 90^\circ$) для будь-якого значення кута α , одержимо

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{\alpha + \varphi}{2}. \quad (8)$$

Висновки. Для оцінки міцності і стійкості укосу, потенційні поверхні руйнування приймаються круглоциліндричними або клиноподібними, але також можливі інші форми.

Армуючий синтетичний матеріал використовується для армування укосів з метою зміцнення ґрунту тіла насипу, підвищення крутості укосів. При цьому важливо враховувати властивості ґрунту земляного полотна, величину вертикальної відстані між прошарками, довжину закладення прошарку в стійку частину укосу, межу міцності геотекстильного матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Иванов П.Л.* Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для гидротехн. спец. вузов / Иванов П.Л. – М.: Высш. шк., 1991. – 447 с.
2. *Дашко Р.Э.* Механика горных пород: Учебник для вузов / Дашко Р.Э. – М.: «Недра», 1987. – 264 с.
3. *Маслов Н.Н.* Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): [учеб. пособие для вузов] / Маслов Н.Н. – М., Стройиздат, 1977. – 320 с.

Петрович В.В., канд. техн. наук

Артеменко В.А.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. Методом спектрального аналізу на основі використання розкладу в ряді Фур'є виконане прогнозування зміни кліматичних показників у часі.

Наведені пропозиції щодо покращення точності прогнозової моделі процесу.

Ключові слова: Розклад в ряд Фур'є, прогнозна модель процесу, точність результатів розрахунків.

Аннотация. Методом спектрального анализа на основе использования разложения в ряд Фурье выполнен прогноз изменения климатических показателей во времени. Приведены предложения по повышению точности прогнозной модели процесса.

Ключевые слова: Разложение в ряд Фурье, прогнозная модель процесса, точность результатов расчета.

Abstract. By means of Fourier series decomposition method was transacted forecast of the change the climatic factors at time. In this article was broughted recommendations on increasing of accuracy forecasting model of the process.

Keywords: Decompositions series by Fourier method, forecasting model of the process, accuracy of the forecasting model.

Незважаючи на постійне удосконалення методів оцінки стійкості дорожніх насипів, питання виникнення раптових причин порушення їх стійкості у періоди активізації опадів залишаються відкритими [1]. Як відомо, інтенсивність опадів як протягом року, так і з року в рік, визначає можливість підняття рівня ґрунтових вод, активізацію виникнення різних деформацій тіла та укосів насипу.

Для наукового обґрунтування планування ремонтних заходів важливо мати модель зміни погодно-кліматичних факторів у часі.

Така модель нестационарного (тобто залежного від часу) процесу може бути використана для уточнення закономірностей розвитку деформацій земляного полотна та планування відповідних ремонтних робіт.

У роботах [2,3] були проаналізовані деякі питання необхідності врахування зміни погодно-кліматичних факторів при розробці дострокових прогнозів стійкості земляного полотна.

Як показав проведений попередній аналіз, негативні природні явища, що безпосередньо впливають на експлуатаційний стан насипів, виникають не постійно, а в деякій періодичності (циклічності). Для розробки методики побудови моделі такої циклічності були використані статистичні методи прогнозування [4].

Однак, як відомо, статистичні методи прогнозування можуть бути некоректні у певних часових рядах. У статті розглянуті методичні аспекти побудови математичної моделі прогнозування погодно-кліматичних явищ методами спектрального аналізу на основі використання розкладу в ряд Фур'є.

Такий підхід певним чином дозволяє розглядати зміни показників процесу у часі та здійснювати обґрунтований прогноз на необхідний інтервал. Цей підхід до проблеми прогнозування дозволяє у першу чергу достатньо точно прогнозувати (подовжувати) часові ряди. Пряме та зворотне перетворення Фур'є з успіхом застосовується у науці та техніці для аналізу та синтезу різних часових рядів (далі – сигналів). Використовуючи пряме та зворотне перетворення Фур'є [5-8], можливо за дискретною часовою вибіркою сигналу прогнозувати його поведінку у майбутньому. Звичайно у реальних експериментах оперують з дискретними та кінцевими часовими послідовностями значень деякої величини.

У даному випадку часовий ряд – це значення функції $F(t)$, що задана на кінцевому числі часових точок t_{II} , тобто незалежною змінною є час:

$$t_{II} = \{t_1, t_2, \dots, t_N\},$$

де N – число точок часового ряду.

Відповідно, у цьому випадку будемо мати і N значень функції $F(t)$:

$$F(t_{II}) = \{F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_N)\}. \quad (1)$$

Ці N значень функції $F(t)$ являють собою певний часовий ряд (сигнал), який і є головним предметом цього дослідження.

При прямому дискретному перетворенні Фур'є одержуємо N коефіцієнтів дискретного ряду Фур'є $C(I)$:

$$C(I) = \{C(1), C(2), \dots, C(N)\},$$

$$\text{де } C(I) = \sum_{II=1}^{II=N} F(II) \cdot \text{Exp} \left(-\frac{j \cdot 2\pi \cdot (I-1) \cdot (II-1)}{N} \right), \quad (2)$$

$$I = 1; 2; \dots; N; j = \sqrt{-1}.$$

Відповідно, маючи N коефіцієнтів у дискретному ряді Фур'є, що одержані за допомогою перетворення (2), маємо можливість одержати всі N значень функції $F(t_{II})$, тобто відтворити вихідний часовий ряд (1). При цьому значення функції $F(t_{II})$ відповідають часовим точкам $t_1, t_2, \dots, t_N$.

Для відновлення вихідного дискретного сигналу на базі дискретного ряду коефіцієнтів дискретного перетворення Фур'є використовується зворотне дискретне перетворення Фур'є

$$F(I) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{II=1}^{II=N} C(II) \cdot \text{Exp} \left(+\frac{j \cdot 2\pi \cdot (I-1) \cdot (II-1)}{N} \right) \quad (3)$$

Суть перетворення Фур'є – обчислення кореляцій між часовим рядом, що аналізується, та базисною функцією перетворення.

Фур'є-перетворення (2) виявляє гармонічні складові часового ряду. Для цього застосовується нескінченно-осцилююча гармонічна (синусоїдальна) функція, що накладається на часовий ряд (сигнал), який аналізується. Далі проводимо порівняння поведінки гармонічної функції та відповідного часового ряду шляхом обчислення кореляції.

Якщо між рядом, що аналізується, та гармонічною функцією є лінійна залежність, тобто є кореляція, це означає, що у складі часового ряду маємо гармонічні складові вибраної (для аналізу) частоти. Далі частота гармонічної функції змінюється і процедура порівняння відповідно повторюється. В результаті одержуємо дискретну спектральну функцію $C(I)$, яка і відображує вихідний часовий ряд (із часової області – в частотну).

Відповідно, зворотне дискретне перетворення Фур'є (3) створює сигнал (вихідний часовий ряд) шляхом підсумовування синусоїд з певними частотами згідно (2) та фазами.

Інформація про амплітуди окремих частотних складових та їх фазах міститься у коефіцієнтах $C(I)$, що одержуються в результаті виконання перетворення (2). При цьому $C(I)$ у загальному випадку являє собою комплексне число, у якому міститься інформація як про амплітуду, так і фазу гармоніки.

Детальний аналіз формул (2) та (3) свідчить про те, що при розрахунку будь-якого коефіцієнта ряду Фур'є враховуються всі N значень функції $F(II)$ для прямого перетворення і, відповідно, при формуванні однієї точки часового ряду $F(I)$ враховуються всі N значень коефіцієнтів $C(II)$ для зворотного перетворення Фур'є. Це у певній мірі свідчить про те, що Фур'є-перетворення відображує поведінку сигналу за весь час його існування. Таким чином, Фур'є-перетворення збирає інтегральну інформацію про часовий ряд (сигнал), який перетворюється згідно формул (2) та (3).

На базі формули (2) можна побудувати спектр часового ряду. Звичайно спектр подають у вигляді двовимірного графіка, у якому на горизонтальній осі відкладають частоту від нуля до певного значення, а на вертикальній осі – амплітуди відповідних частотних складових спектра.

Для одержання спектра слід враховувати як весь час, так і проміжки часу між послідовними точками часового ряду. При цьому для одержання спектра необхідно, щоб перша часова точка дорівнювала нулю ($t_1=0$). Відповідно, для подальших часових точок будемо мати

$$t_2 = t_1 + \Delta t = \Delta t;$$

$$t_3 = t_2 + \Delta t = 2\Delta t;$$

$$t_4 = t_3 + \Delta t = 3\Delta t;$$

.....

$$t_N = t_{N-1} + \Delta t = (N - 1)\Delta t,$$

тобто,

$$t = \{\Delta t; 2\Delta t; \dots; (N - 1)\Delta t\}.$$

Для коректного Фур'є-перетворення згідно (2) та (3) необхідно, щоб інтервал Δt був постійним. Таким чином, маємо два обмеження:

$$\begin{cases} t_1 = 0; \\ \Delta t = \text{const.} \end{cases}$$

Слід зазначити, що на горизонтальній вісі графіка спектра можна відкладати не тільки частоту $f = \frac{1}{T}$, герц (T – період коливань), але й кутову частоту (при необхідності)

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}.$$

Маючи ряд часових точок, в яких проводили вимірювання певної величини, а також початкову (завжди нульову) та кінцеву часові точки, завжди маємо можливість від Фур'є-спектра переходити назад до часового ряду (сигналу), від якого і був породжений даний Фур'є-спектр. При цьому синтез сигналу (часового ряду) здійснюється підсумовуванням синусоїд з певними частотами, амплітудами та фазами.

Тому у загальному випадку необхідно мати ще один Фур'є-спектр, де на горизонтальній вісі відкладають частоту, а на вертикальній – фази синусоїд. Така інформація може бути одержана при прямому Фур'є-перетворенні, оскільки коефіцієнти ряду Фур'є – це комплексні числа.

На базі інформації про Фур'є-перетворення, коротко наведений вище, авторами був розроблений та перевірений метод подовження часових рядів, тобто передбачення певного ряду (сигналу) на майбутнє.

При цьому використовуються дані про часовий ряд, одержані на теперішній момент часу.

Для прикладу проаналізуємо дані деяких вимірів на часовому інтервалі $0 \dots 20$ од. часу. Виміри проводили з інтервалом 1 од. часу. З цих даних можна виділити частину даних, що відповідають часовому інтервалу $0 \dots 10$ од. часу, і далі за допомогою прямого дискретного перетворення Фур'є одержати

відповідний Фур'є-спектр $S1$ цих даних, тобто одержати Фур'є-спектр даного дискретного сигналу.

Відповідно, із вихідного ряду $[0 \dots 20]$ од. часу] можна також виділити частину даних, що відповідають часовому інтервалу $0 \dots 15$ од. часу та одержати Фур'є-спектр $S2$. Далі введемо припущення, що Фур'є-спектр (як для амплітуд, так і фаз) $S1 \cong S2$. На даному рівнянні (строгому або наближеному) і базується запропонований метод прогнозу, тобто подовження (за часом) часових рядів.

Із наведеного вище також зрозуміло, що за Фур'є-спектром сигналу є можливість відтворити сам сигнал згідно перетворення (3).

Наприклад, сигнал $0 \dots 10$ од. часу має наступний спектр:

Частота, герц	Амплітуда, од.
1	0,3
3	0,5
5	0,7

Відповідно, припускаємо, що такий же спектр має і сигнал (часовий ряд) $0 \dots 15$ од. часу.

Таким чином, маючи часовий ряд (сигнал) для інтервалу $0 \dots 10$ од. часу, можна побудувати і часовий ряд (сигнал) для інтервалу $0 \dots 15$ од. часу. Оскільки $S1 \cong S2$, то завжди можна переходити від спектра до сигналу (часового ряду). Тобто, якщо є часовий ряд $R1$ довжиною $N1$ з дискретизацією за часом Δt_1 , завжди можна побудувати Фур'є-спектр $S1$ для $R1$.

Відповідно, для часового ряду $R2$ довжиною $N1 + NN1$ та дискретизацією за часом Δt_2 ($\Delta t_1 = \Delta t_2$) можливо побудувати свій спектр Фур'є (виходячи з припущення, що $S2 \equiv S1$). При цьому вважаємо $R2$ спочатку невідомим, а далі, виходячи із припущення $S2 \equiv S1$, будуємо часовий ряд $R2$.

Друга частина ряду $R2$ довжиною $NN2$, що передбачається за часом, і має безпосередній практичний інтерес.

З точки зору програмної реалізації запропонованого метода подовження часових рядів необхідно виконати ряд вимог.

1. Для Фур'є-спектра вихідного часового ряду (сигналу) $R1$ довжиною $N1$, тобто для $S1$ і, відповідно, для Фур'є-спектра сигналу, що був синтезований, довжиною $N1 + NN1$, тобто $S2$ (при $\Delta t_1 = \Delta t_2$) місцеположення спектральної лінії, що відповідає деякій певній частоті f_i (наприклад, 1 Гц) буде різною внаслідок різної довжини часових рядів $R1$ та $R2$.

2. Фур'є-спектри, одержані згідно (2) для прямого дискретного перетворення Фур'є, будуть симетричними відносно своєї середини, в зв'язку з чим можливе використання тільки половини спектрів, де є вся необхідна інформація. Це дозволяє суттєво спростити програму, але вимагає внесення відповідної корекції амплітудних та фазових складових Фур'є-спектру для збереження необхідного функціонування програми.

3. Оскільки зворотне дискретне перетворення (3) містить множник $\frac{1}{N}$, необхідно зробити відповідну корекцію при обчисленні часового ряду $R2$.

4. З точки зору безпосереднього одержання (синтезу) часового ряду $R2$ необхідності в побудові Фур'є-спектрів $S1$ та $S2$ в явному вигляді немає. Тому при програмній реалізації запропонованого метода є можливість використати пряме (2) та зворотне (3) дискретні перетворення Фур'є без явної побудови $S1$ та $S2$ (з врахуванням відповідних умов, розглянутих вище).

5. Запропонований метод прогнозу є універсальним і може використовувати різноманітні прямі /зворотні перетворення при умові, що такі перетворення мають такі ж інтегральні властивості (можливості аналізу сигналу як цілого), як і наведені у статті. Наприклад, можна використовувати пряме та дискретне перетворення Хартлі, або інші.

Таким чином, запропонований метод подовження часових рядів є достатньо універсальним стосовно вибору пар прямих/зворотних перетворень. Метод був програмно втілений як у середовищі програмування MATLAB (у вигляді М-файла або вигляді EXE-файла), так у середовищі програмування DELPHI (EXE-файл, що виконується). В усіх реалізаціях програми вхідні та контрольні дані вводилися як текстовий файл. Програма вимагає від користувача вказати число (ціле) часових точок, на яке необхідно подовжити вихідний часовий ряд.

У результаті проведених розрахунків користувач отримує синтезований (подовжений у часі) ряд. Програма дозволяє зберігати дані про синтезований ряд у вигляді текстового файлу, що досить зручно при проведенні відповідного аналізу іншими програмними засобами.

Але особливий інтерес – це подовження часових рядів, графіки яких є досить складними. Так, наприклад, часовий ряд (рис. 1) був згенерований для 0 ... 199 од. часу (крок – 1 од. часу) як сума близько 20 синусоїдальних складових з різними частотами (які не є кратними) та амплітудами.

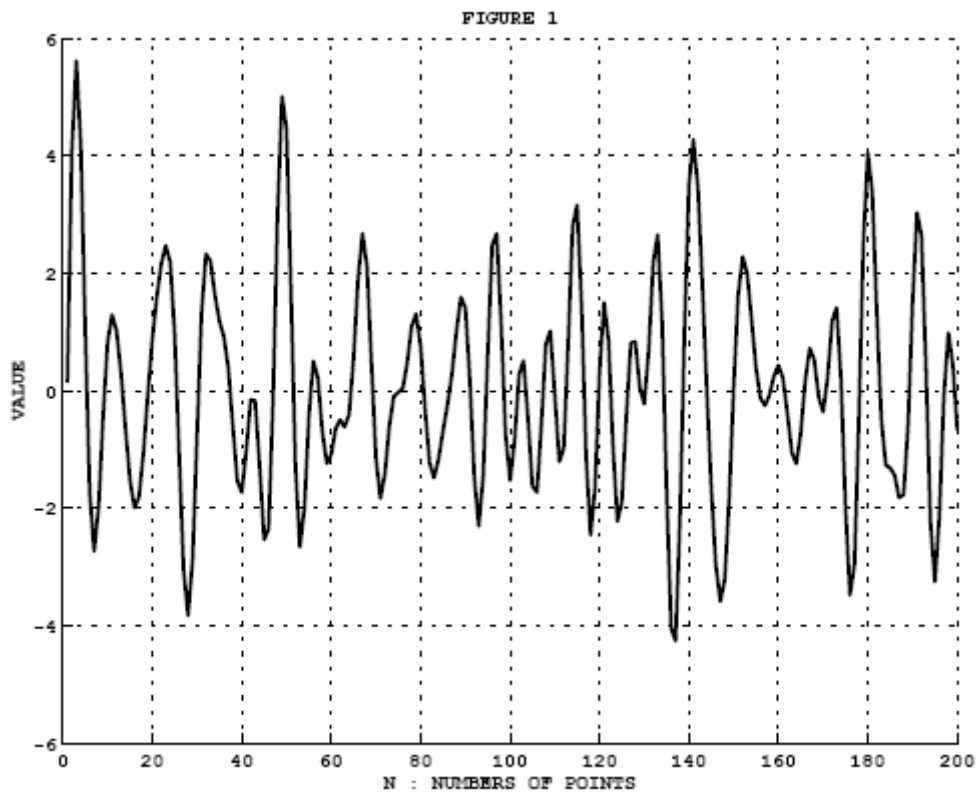


Рис. 1

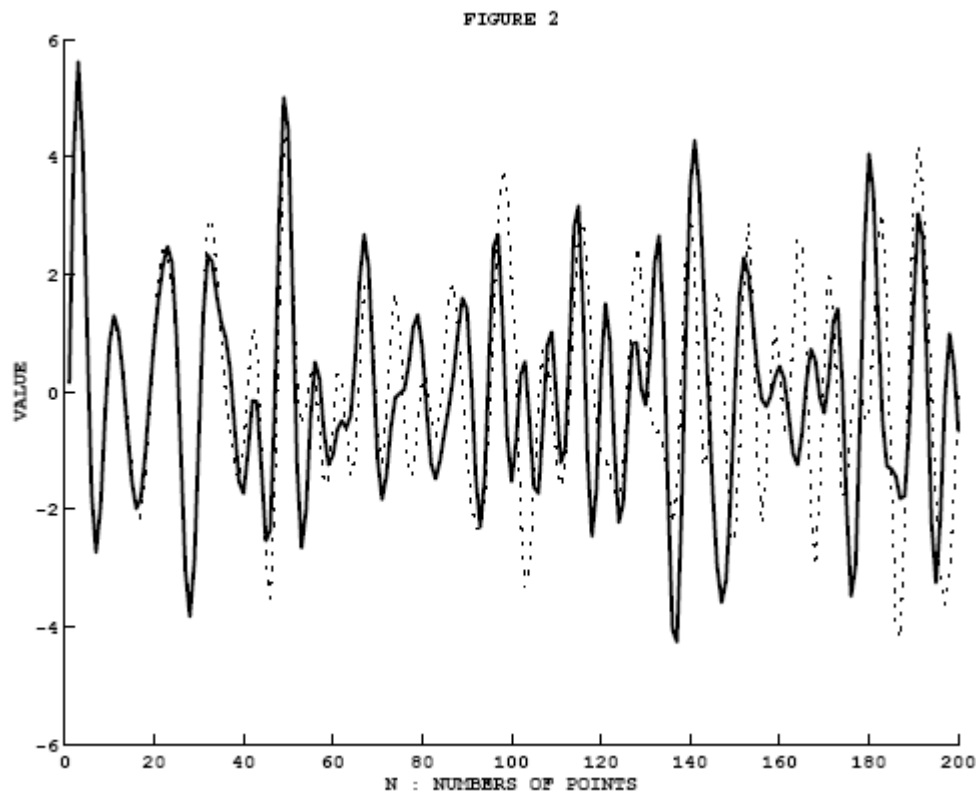


Рис. 2

На рис. 2 наведені результати розрахунків по подовженню частини часового ряду (150 перших точок згідно рис. 1) вперед на 50 точок для досягнення загальної довжини ряду у 200 часових точок.

Нарівні з синтезованим часовим рядом (штрихова лінія) наведений також графік контрольного ряду (суцільна лінія) з метою оцінки точності прогнозу. Аналіз подовження таких складних часових рядів показав, що подовження на 30% за часом вже призводить до помилок (розходження кривих). Тому для одержання достатньо позитивних результатів слід значно зменшувати величину, на яку подовжується такий ряд.

Але навіть при неспівпаданні синтезованого та контрольного часових рядів загальна тенденція щодо їх форми безумовно має місце, тобто сигнали співпадають за формою в цілому, але не співпадають між собою в окремих часових точках.

Оскільки для деяких випадків необхідним є подовження тільки з точки зору топологічної еквівалентності сигналу, що подовжується, сигналу

вихідному, слід зазначити, що запропонований метод прогнозу і в цьому випадку можна використовувати.

Як тестовий приклад розглянемо застосування метода до конкретних природних часових рядів. Був виконаний прогноз зміни сонячної активності, враховуючи опосередкований вплив цього показника на стан автомобільних доріг [9] та надійні вихідні дані. Аналіз проводився за даними про зміну чисел Вольфа W згідно « Каталога индексов солнечной и геомагнитной активности ».

Із середньорічних значень контрольного ряду чисел Вольфа W , починаючи з 1700 р. ($t = 0$) до 2007 р., останні десять часових значень (точок) прогнозували (подовжували) також за допомогою розробленої програми та порівнювали графіки (див. рис.3).

Подовжений (спрогнозований) часовий ряд зображено пунктирною лінією.

Повністю контрольний та синтезований за допомогою програми ряд наведені на рис. 4.

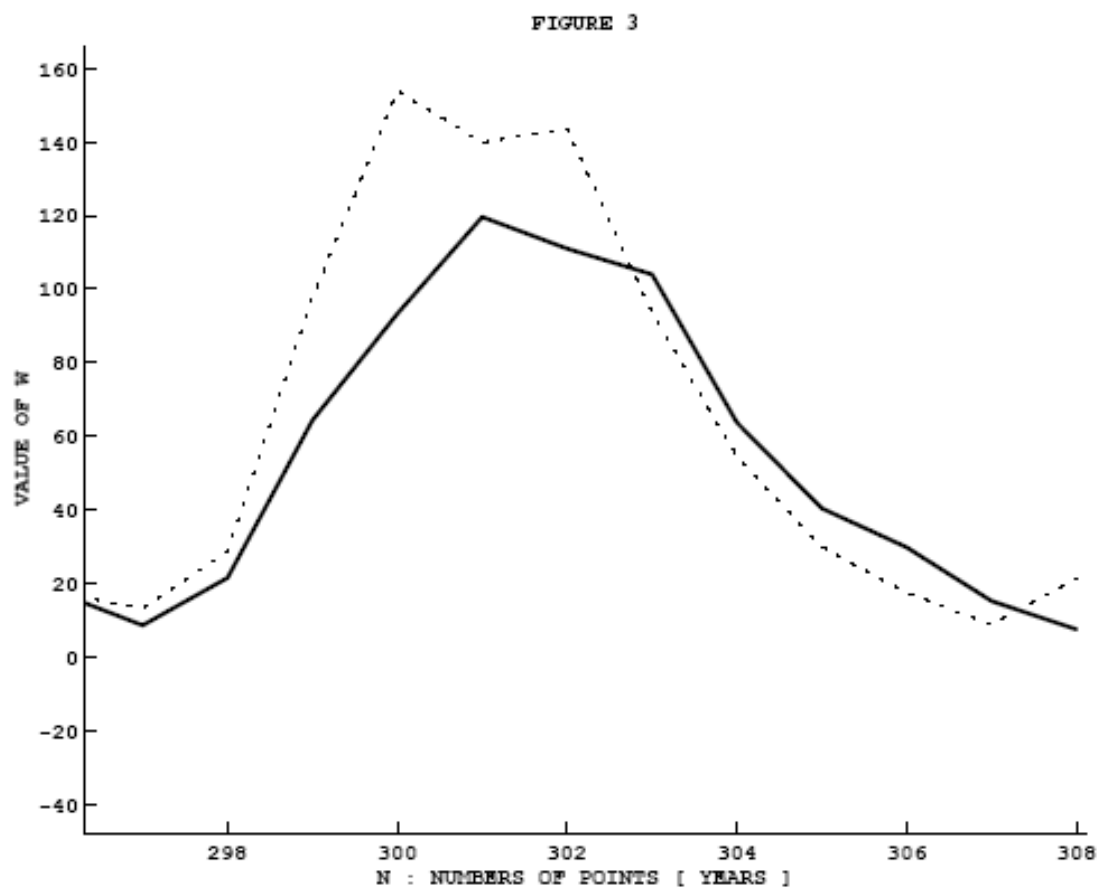


Рис. 3

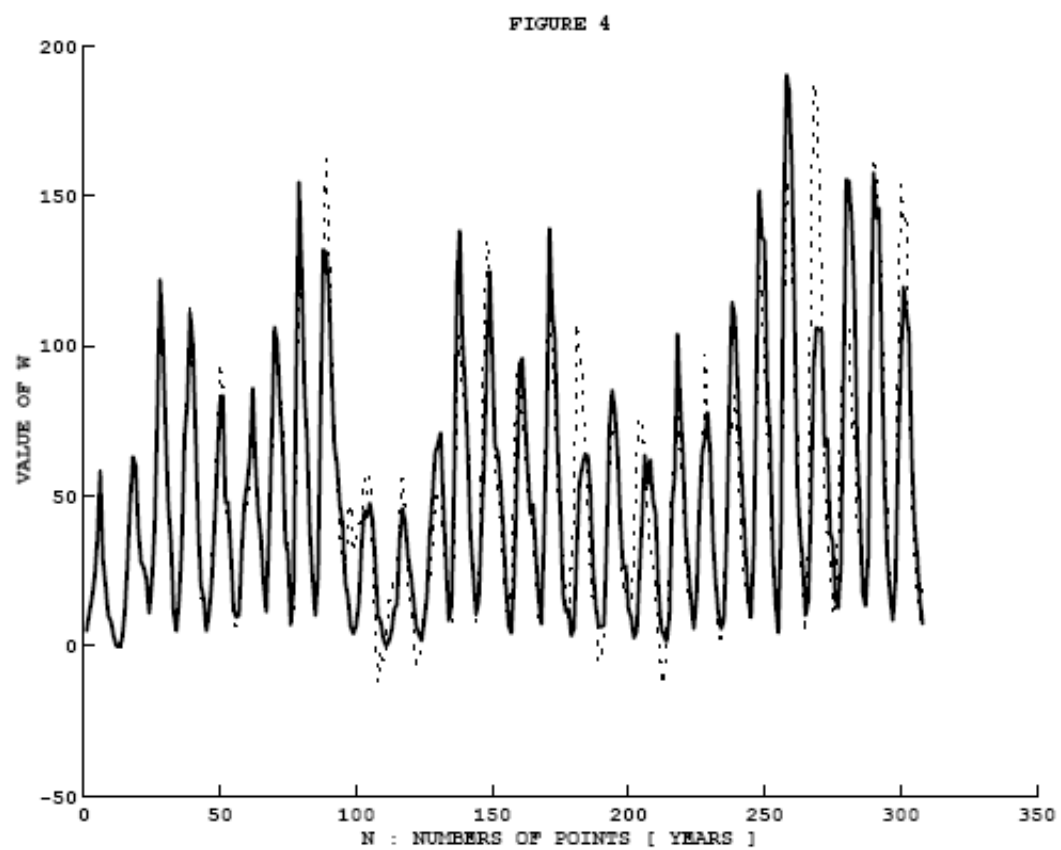


Рис. 4

Як видно, синтезований ряд практично на всьому часовому інтервалі достатньо добре співпадає з контрольним часовим рядом (суцільна лінія). Якщо синтезований ряд достатньо добре співпадає з контрольним вихідним рядом (по всій довжині часового інтервалу), подальше подовження останнього можна вважати достатньо реалістичним (див. графік на рис. 4). Якщо немає такого співпадіння, – подальше подовження у часі не буде достовірним. Цей критерій застосування запропонованого метода подовження до складних часових рядів має місце у переважній більшості випадків. Також слід врахувати, що мають місце часові ряди, що значно відрізняються за формою графіків, але з однаковими Фур'є-спектрами.

Так, наприклад, деякий часовий ряд (сигнал) може бути утворений сумою синусоїд з частотами w_1 та w_2 і мати спектр як у деякого іншого сигналу, у якого одну половину часу присутня синусоїда з частотою w_1 , а інша половина часу – з частотою w_2 . Часові ряди в обох випадках програма подовжує з припущення, що будь-який ряд на всьому часі свого існування утворений сумою синусоїдальних складових з частотами w_1 та w_2 відповідно (тобто, як у першого сигналу). Таким чином, перший часовий ряд логічно подовжений правильно, а другий – неправильно. Проте оскільки більшість природних процесів утворюють часові ряди за принципом першого сигналу (див. вище), цей метод прогнозування часових рядів практично постійно буде працювати правильно.

Метод дозволяє також подовжувати навіть часовий ряд помилок (різниця значень вихідного ряду та частини ряду подовженого). Віднімаючи з подовженого ряду відповідно подовжений ряд помилок, можливо у ряді випадків значно (іноді на порядок!) зменшити помилку прогнозування. При цьому, зрозуміло, вихідний ряд помилок має таку ж довжину, як і відповідно контрольний часовий ряд. Уточнений метод з корекцією помилок дозволяє отримати більш надійні результати прогнозу без значних ускладнень процесу розрахунків. Наведений у статті підхід до прогнозування був застосований для аналізу зміни різних показників при виникненні надзвичайних ситуацій.

Запропонований метод прогнозу дає можливість одержати реалістичні результати при аналізі зміни показників, в той час як класичні статистичні методи прогнозування у багатьох випадках працювали некоректно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гольдштейн М.Н. О причинах внезапного нарушения устойчивости высоких насыпей. // Земляное полотно и геотехника на железнодорожном транспорте. – Днепропетровск, ДИИТ, 1984. – С. 16-26.
2. Заворицький В.Й., Литвиненко А.С., Артеменко А.В. Про вплив погодно-кліматичних факторів на стійкість земляного полотна в умовах УРСР. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, вип. 45. – К.: Будівельник, 1989. – С. 36 – 40.
3. Заворицький В.Й., Литвиненко А.С., Артеменко А.В. Прогнозування стійкості земляного полотна за аналізом циклічності погодно-кліматичних умов УРСР. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, вип. 46. – К.: Будівельник, 1990. – С. 30 – 35.
4. Литвиненко А.С. Дослідження циклічності погодно-кліматичних умов України в зв'язку з прогнозуванням впливу небезпечних природних явищ на стан автомобільних доріг. // Дороги і мости, вип. 5. - К.: ДерждорНДІ, 2006. – С. 74 – 89.
5. Воробьев Н.Н. Теория рядов. - М.: Наука, Физмат, 1979. – 408 с.
6. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. - М.: Мир, 1976. – 755 с.
7. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. - М.: Мир, 1980. – 536 с.
8. Марпл –мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990. – 584 с.
9. Журавлев М.М. Солнечная активность и условия эксплуатации транспортных сетей. // Автомобильные дороги, 1980. - № 3. – С. 25 – 26.

Мозговий В.В., д.т.н., **Бесараб О.М.,** к.т.н., **Каськів В.І.,** к.т.н.,
Мозговий О.В.

ПРОЕКТУВАННЯ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

Анотація. Розглянуті питання формування умов граничного стану конструкції дорожнього одягу при проектуванні його капітального ремонту.

Ключові слова: автомобільна дорога; дорожній одяг; капітальний ремонт; граничний стан.

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования условий предельного состояния конструкции дорожной одежды при проектировании его капитального ремонта.

Ключевые слова: автомобильная дорога; дорожную одежду; капитальный ремонт; предельное состояние.

Abstract. The formation conditions limit state design of pavement in the design of its overhaul.

Keywords: highway, road wear, repair, limiting state.

Капітальний ремонт – один з найпоширеніших матеріало- і капіталомістких видів ремонтно-відновлювальних робіт. Причому, із формуванням мережі автомобільних доріг, цей вид робіт стає домінуючим.

Із позицій механіки дорожнього одягу [2–4] до капітального ремонту дорожніх одягів відносять комплекс заходів і робіт, направлених на відновлення міцності, жорсткості і розподільної здатності кожного елемента дорожнього одягу або всієї конструкції в цілому. Тобто, усунення причин несправного стану дорожнього одягу або на зменшення їх впливу.

У більшості країн на автомобільних дорогах, де необхідно проводити капітальний ремонт дорожнього одягу, за міжремонтний строк зростає не тільки інтенсивність руху, але і збільшуються транспортні навантаження. Це відбувається, як правило, за рахунок збільшення частки важких транспортних засобів, збільшення їх вантажопідйомності, навантажень на осі, тиску на

контакті колеса з дорогою тощо. Все це призводить до підвищення вимог до міцності дорожнього одягу автомобільних доріг на стадії виконання чергового капітального ремонту.

Характерною особливістю для країн колишнього Радянського Союзу є та обставина, що більшість доріг, яким потрібен капітальний ремонт, розраховані на навантаження групи Б (60 кН на вісь) або групи А (100 кН на вісь). Проте, у багатьох із цих країн, щоб сприяти зменшенню собівартості автомобільних перевезень, нормативними документами вже дозволені збільшені навантаження розрахункових автомобілів з параметрами 115 кН на вісь і навіть 130 кН на вісь. Безумовно, тим самим відкривається “зелена вулиця” перевізникам з використання транспортних засобів підвищеної вантажопідйомності, з метою підвищення продуктивності перевезень. Проте цей процес відбувається із значним відставанням належного посилення конструкцій дорожнього одягу існуючих автомобільних доріг до необхідних параметрів за міцністю. Як показують розрахунки, таке збільшення автомобільних навантажень на дорожній одяг викликає скорочення їх строку служби у 2–4 рази і більше [4].

Отже, виникла серйозна загроза повного руйнування автомобільних доріг, якщо не будуть терміново вжиті заходи з виконання капітального ремонту на дорогах, де конструкції дорожнього одягу не розраховані на збільшені існуючі навантаження.

Конструкції дорожнього одягу на момент виконання капітального ремонту в більшості випадків мають низку різних видів руйнувань і деформацій, що порушують їх суцільність, розподільну здатність та утруднюють нормальну і безпечну експлуатацію автомобільних доріг. До найпоширеніших видів руйнувань і деформацій, які вже не можна виправити методами поточного ремонту відносять: часті поперечні і поздовжні тріщини, сітку тріщин, просідання, уступи, зсуви, хвилі, напливи тощо.

Руйнування і деформації є наслідком основних причин – недотримання критеріїв граничного стану конструкції дорожнього одягу.

Як й інші будівельні конструкції, дорожній одяг потрібно розраховувати за двома групами граничних станів: за несучою здатністю і за деформаціями, що утруднюють експлуатацію.

При розрахунках за несучою здатністю потрібно забезпечити збереження міцності конструкції (здатності протистояти руйнуванню). Як критерій

граничного стану слід приймати той, що є самим небезпечним для даного елемента конструкції.

Наприклад, для зернистих матеріалів, що мають між собою зв'язки, і, які працюють на розтягування, руйнуванням є розділення їх на частини. Тому шари з асфальтобетону, цементобетону, цементогрунту тощо розраховують на розтяг при згині.

Критерієм граничного стану приймають горизонтальне нормальне розтягуюче напруження σ_r або горизонтальну відносну деформацію подовження ε_r поблизу підшви шару при його згині:

$$\sigma_r < \overline{\sigma_r} \text{ або } \varepsilon_r < \overline{\varepsilon_r}, \quad (1)$$

де $\overline{\sigma_r}$, $\overline{\varepsilon_r}$ – допустимі значення відповідно напруження і деформації.

При невиконанні цих умов виникне тріщина, що буде розвиватися вгору.

Для елемента дорожнього одягу з незв'язного матеріалу, а також для ґрунту земляного полотна руйнуванням вважають необоротний зсув. Тому їх у багатьох країнах розраховують на стійкість проти зсуву.

Критерієм граничного стану є напруження зсуву по найнебезпечнішій площині:

$$\tau_a \leq \overline{\tau_a}, \quad (2)$$

де τ_a – активне напруження зсуву;

$\overline{\tau_a}$ – допустиме значення активного напруження зсуву.

При невиконанні цієї умови після кожного проїзду відбувається необоротний зсув і на рівні поверхні слабозв'язного шару або земляного полотна утворюються залишкові деформації (колії, просідання).

У деяких країнах віддають перевагу більш простим критеріям:

$$\sigma_z \leq \overline{\sigma_z}, \quad (3)$$

де σ_z – вертикальне нормальне напруження на поверхні шару із незв'язного матеріалу або ґрунту земляного полотна;

$\overline{\sigma_z}$ – допустиме вертикальне нормальне напруження.

Або аналогічно за відносною вертикальною деформацією стиснення:

$$\varepsilon_z \leq \overline{\varepsilon_z}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_z, \overline{\varepsilon_z}$ – відповідно відносна і допустима відносна вертикальні деформації стиснення.

При розрахунку за деформаціями, що утруднюють експлуатацію конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу (глибина колії, висота і глибина поздовжніх нерівностей), накопичення залишкового переміщення поверхні покриття достовірно прогнозувати складно, тому доцільно нормувати його оборотне переміщення – пружній прогин w .

Цей підхід ґрунтується на таких міркуваннях:

- чим менший пружній прогин, тим для даного ґрунту і дорожньо-будівельного матеріалу менше залишковий прогин;
- пружній прогин поверхні дорожнього покриття під колесом автомобіля легко виміряти, а залишковий прогин від одного проїзду виміряти практично неможливо.

У цьому випадку при проектуванні дорожнього одягу нежорсткого типу обмежують пружній прогин покриття в момент введення дороги в експлуатацію:

$$w \leq \overline{w}(N), \quad (5)$$

де w – пружній прогин поверхні покриття під дією нормативного навантаження в період перезволоження ґрунту земляного полотна (весна, осінь);

$\overline{w}(N)$ – допустиме значення, яке залежить від перспективної інтенсивності руху (останній рік служби перед ремонтом).

Значення $\overline{w}(N)$ встановлені на основі масового обстеження дорожнього одягу, що знаходився у задовільному стані тривалий час при різній добовій інтенсивності руху. Цей розрахунок називають розрахунком за критерієм пружного прогину. Оскільки пружній прогин w і загальний модуль пружності дорожнього одягу $E_{заг}$ взаємопов'язані, відповідно, взаємопов'язані і допустимий пружній прогин $\overline{w}(N)$ з потрібним модулем пружності $E_{номп}(N)$, то

критерій за допустимими деформаціями набуде вигляду умови забезпечення необхідної жорсткості конструкції дорожнього одягу:

$$E_{zag} \geq E_{номр}(N). \quad (6)$$

Для жорсткого дорожнього одягу при розрахунку за деформаціями, що утруднюють експлуатацію конструкції, за основу приймають величину уступу між суміжними цементобетонними плитами.

Таким чином, обґрунтуванням призначення капітального ремонту є оцінка дотримання всіх умов граничного стану конструкції дорожнього одягу.

У разі недотримання цих умов, потрібно приймати рішення про виконання капітального ремонту. Після прийняття такого рішення, здійснюють проектування дорожнього одягу, що складається з наступних основних етапів:

- конструювання варіантів дорожнього одягу;
- виконання розрахунків для визначення товщини шарів, виходячи з умов забезпечення всіх критеріїв граничного стану конструкції дорожнього одягу;
- вибір раціонального варіанту конструкції дорожнього одягу для виконання капітального ремонту.

Конструювання дорожнього одягу є найважливішим і відповідальним етапом проектування та, головним чином, базується на досвіді інженерів, наявності сучасних матеріалів і техніки. Крім того, при конструюванні дорожнього одягу необхідно враховувати загальні принципи конструювання і забезпечувати виконання функцій для кожного елемента дорожнього одягу: покриття, основи, додаткової основи.

Конструювання дорожнього одягу при капітальному ремонті повинне забезпечувати раціональне використання дорожньо-будівельних матеріалів існуючого дорожнього одягу, шарів і матеріалів посилення з урахуванням їх доступності і технологічності. При цьому, як правило, існуюча конструкція дорожнього одягу використовується як додаткова основа або як основа.

Б.С. Радовським виділено **три групи принципів конструювання дорожнього одягу** [3]: раціональний розподіл матеріалів по глибині проїзної частини, раціональний розподіл матеріалів по ширині проїзної частини, раціональне конструювання відповідно до змін умов роботи дорожнього одягу в часі.

Раціональний розподіл матеріалів по глибині повинен передбачати розміщення найбільш міцних дорожньо-будівельних матеріалів у самих напружених зонах конструкції.

Загальний принцип конструювання дорожнього одягу по товщині полягає в тому, що раціональний розподіл матеріалів по глибині конструкції повинен встановлюватися, виходячи із закономірностей її напружено-деформованого стану. Лише таким чином можна одержати раціональні, з точки зору будівельної механіки, конструкції. Як правило, такі конструкції характеризуються зниженою матеріалоемністю порівняно з іншими дорожніми одягами або при тій же матеріалоемності – підвищеною міцністю.

Матеріали і в'язучі традиційно розподіляють таким чином, щоб вартість одиниці об'єму шару знижувалася із глибиною від поверхні дорожнього одягу, на яку впливає зовнішнє навантаження. Цей принцип вперше запропонував О.К. Біруля [1], згідно якого оптимальний вид епюри зміни модулів пружності шарів по глибині Z аналогічний зміні вертикального нормального напруження у дорожньому одязі:

$$E(z) = E_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-z}{H} \cdot \frac{\ln E_{\max}}{E_{\min}}\right), \quad (7)$$

де $E_{\max}$, $E_{\min}$ – модулі пружності відповідно дорожнього покриття і земляного полотна;

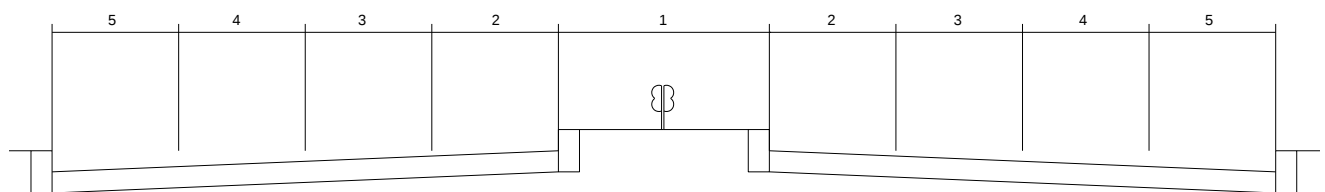
H – товщина дорожнього одягу.

Надалі цей принцип був удосконалений з урахуванням того, що більш небезпечними для укріплених в'язучими шарів дорожнього одягу є горизонтальні розтягуючі напруження, а не вертикальні стискаючі. Тому при конструюванні дорожнього одягу з таких шарів, багатьма дослідниками було доведено, що потрібно так розподіляти в'язуче, щоб найкращим чином використати здатність матеріалів чинити опір розтягуванню при згині дорожнього одягу [4, 5]. У цьому випадку епюра зміни модуля пружності по глибині набуде форму двотаврового перерізу.

Раціональний розподіл матеріалів по ширині проїзної частини пов'язаний із врахуванням нерівномірності впливу навантажень по ширині проїзної частини.

Наприклад, на автомагістралях з великою кількістю смуг руху умови роботи шарів дорожнього одягу в межах різних смуг нерівноцінні, оскільки вантажні автомобілі великої вантажопідйомності займають дві перші смуги руху, а

легкові автомобілі здебільшого розподіляються лівіше. У таких випадках доцільно проектувати дорожні одяги різної товщини для різних смуг руху. Проте, різка відмінність у товщині шарів дорожнього одягу суміжних смуг може призвести до стрибкоподібної зміни міцності конструкції і стати причиною утворення поздовжніх тріщин на границі цих смуг. Крім того, влаштування шарів із стрибкоподібною зміною товщини по ширині проїзної частини призводить до технологічних труднощів. Подібних недоліків можна уникнути при поступовій зміні товщини дорожнього одягу по ширині проїзної частини. Для цього досить надати поверхні ґрунту земляного полотна і шарам основи поперечного похилу, що перевищує похил поверхні покриття (рис. 1).



- 1 - розділювальна смуга;
- 2 - смуга руху для легкового транспорту;
- 3, 4 - смуги руху змішаного потоку;
- 5 - смуга руху для вантажних автомобілів та автомобілів, що рухаються з малою швидкістю

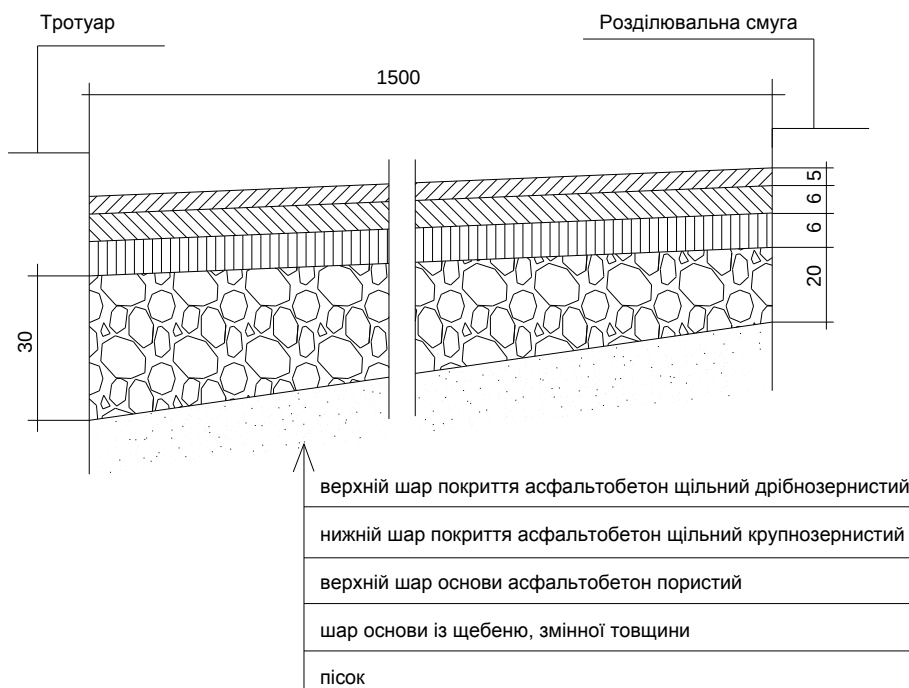


Рис. 1. Конструкція дорожнього одягу автомобільної дороги із вісьмома смугами руху

Раціональне конструювання дорожнього одягу відповідно до зміни умов роботи в часі ґрунтується на врахуванні умов роботи дорожнього одягу в річному циклі й у процесі служби. Найбільш несприятливі умови в районах із континентальним кліматом при зв'язних ґрунтах земляного полотна створюються навесні або восени, коли внаслідок перезволоження знижуються твердість і міцність ґрунту. Навпаки, при піщаних ґрунтах найнебезпечнішим може виявитися літо, коли міцність асфальтобетонного покриття й ґрунту є найменшою. У зв'язку із сезонною нерівноцінністю умов роботи вважається, що раціональною є така конструкція дорожнього одягу, для якої запас міцності за всіма критеріями граничного стану мало коливається протягом року.

Із цього погляду близькими до раціональних є дорожні одяги із асфальтобетонним покриттям. У жарку пору року, коли модуль пружності і показники міцності асфальтобетону зменшуються, зростають модуль та опір зсуву зв'язного ґрунту земляного полотна. І навпаки, восени та навесні, коли зв'язний ґрунт земляного полотна має пониженою несучу здатність, асфальтобетон характеризується підвищеною міцністю й твердістю.

Неоднорідність умов роботи дорожнього одягу протягом строку служби обумовлена поступовим підвищенням інтенсивності руху й осьових навантажень. У цих випадках доцільне навмисне введення в дорожній одяг шару з матеріалу, що підвищує свою міцність протягом тривалого часу з темпом, що приблизно відповідає темпу зростання інтенсивності руху (наприклад, шари основи із сумішей на основі гранульованих доменних шлаків або матеріали, укріплені цементом).

Слід зазначити, що існуючі нормативні методи проектування дорожнього одягу при їх конструюванні і розрахунку, в основному були спочатку орієнтовані на нове будівництво. Тому, вони недостатньо враховують реальну різноманітність варіантів розрахункових схем, можливостей нових технологій, матеріалів і механізмів. У зв'язку з цим, при вирішенні питань капітального ремонту доцільно для важливих, відповідальних об'єктів, як на стадії проектування, так і на стадії ремонту організувати науковий супровід. З його допомогою є можливість знайти відповідь на питання, які не відображають або не достатньо повно відображають діючі нормативні документи.

Одним з невирішених до кінця питань є врахування діючих температурних розтягуючих напружень, у шарах з монолітних матеріалів, що виникають при коливаннях температури. У теперішній час, на підставі проведених досліджень [4–8], є можливість для кожного конкретного об'єкта індивідуально виконувати такі розрахунки для різних розрахункових схем. Це дозволяє обґрунтовано вибирати прогресивні матеріали і технології для виконання капітального ремонту дорожнього одягу з підвищеною його стійкістю до температурного розтріскування.

Також потрібно звернути увагу, що при конструюванні дорожнього одягу для капітального ремонту і прагненні максимально використати існуючий дорожній одяг викликають значні проблеми у зв'язку з його неоднорідністю, внаслідок наявності різного роду руйнувань і деформацій, нерівномірно розташованих у плані і по товщині конструкції. Дослідження показують, що із збільшенням неоднорідності основи значно збільшується товщина і вартість шарів посилення [4, 9]. Тому при конструюванні дорожнього одягу для капітального ремонту потрібно прагнути підвищити однорідність існуючого дорожнього одягу залежно від ступеню його пошкодження. При цьому процедура підготовки існуючого дорожнього одягу до виконання капітального ремонту може містити наступні конструктивно-технологічні прийоми:

- окремі локальні ремонти з відновлення несучої і розподільної здатності;
- зняття одного або декількох самих пошкоджених шарів нежорсткого дорожнього одягу;
- ресайклінг одного або декількох шарів нежорсткого дорожнього одягу;
- фрагментація жорсткого дорожнього одягу на окремі блоки “безпечних” розмірів;
- повне зняття всіх шарів із подальшою переробкою і повторним повним або частковим використанням регенованих матеріалів.

Важливим питанням є більш об'єктивне врахування температури і тривалості дії навантаження при проектуванні асфальтобетонних шарів посилення на шарах основи із матеріалів різної термореологічної чутливості.

Тобто для тих випадків, коли властивості матеріалів, що визначають рівень напружень і деформацій та впливають на виконання умов граничного стану, залежать від температури і тривалості дії навантаження [2–4, 11, 12].

Як показали дослідження, дорожній одяг має тим більший обсяг руйнувань, чим більша тривалість дії навантаження. Це особливо характерно для ділянок доріг де можливе сповільнення руху транспорту та його зупинки (перехрестя, затяжні підйоми, міські умови) (рис. 2). Тут можна виділити чотири характерних зони з різними закономірностями поєднання тривалості дії навантаження:

- ділянка безперервного руху (ДБ);
- ділянка гальмування (ДГ);
- ділянка зупинки (ДЗ);
- ділянка розгону (ДР).

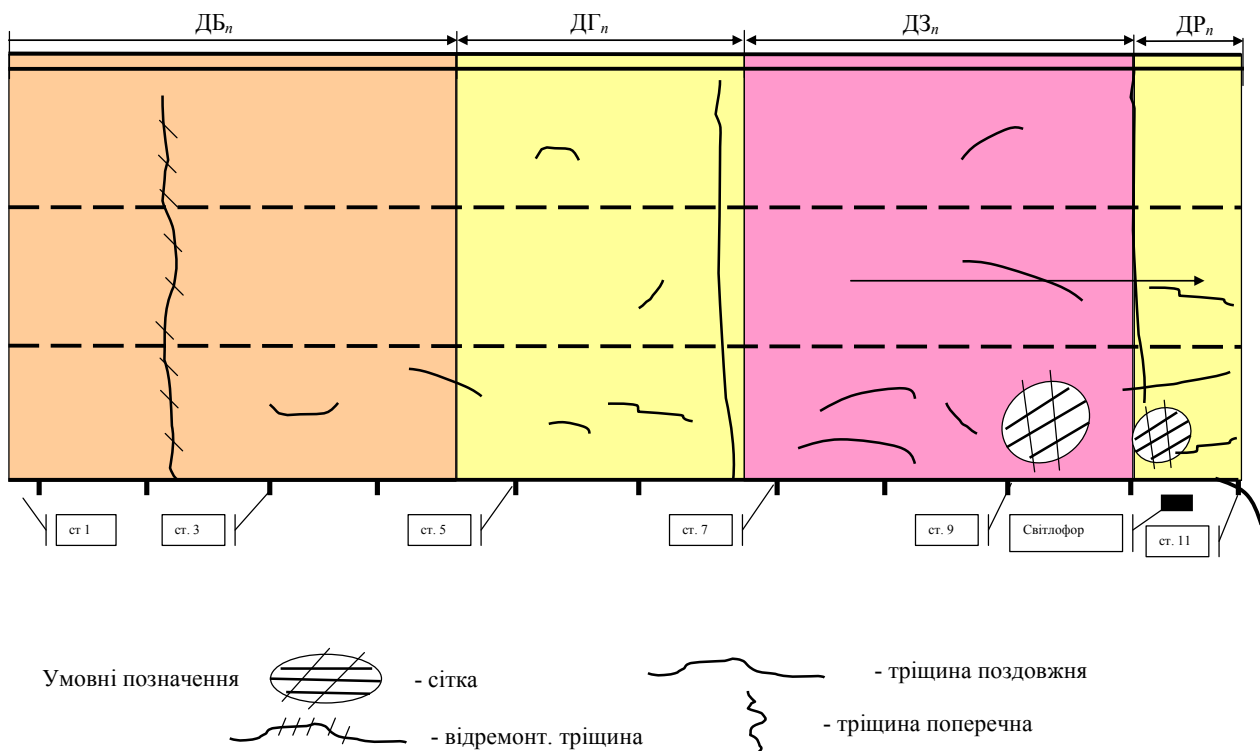


Рис. 2. Види і схема розташування руйнувань на характерних ділянках смуг руху

У **табл. 1** наведені результати натурних досліджень характеру навантаження дорожнього одягу у період з 2000 року по 2003 рік.

Таблиця 1

Середній час дії навантаження на асфальтобетонне покриття на характерних ділянках, с			
Ділянка безперервного руху (ДБ)	Ділянка гальмування (ДГ)	Ділянка зупинки (ДЗ)	Ділянка розгону (ДР)
$t_o'' = 0,10-0,05$	$t_o'' = 0,10-0,05$ $t_z'' = 0,5-0,2$	$t_o'' = 0,10-0,05$ $t_z'' = 0,5-0,2$ $t_3'' = 20-50$; $t_p'' = 0,1-3,0$	$t_o'' = 0,10-0,05$ $t_p'' = 0,1-3,0$
Частка автомобілів з різним часом дії навантаження на характерних ділянках			
ДБ	ДГ	ДЗ	ДР
$\delta(t_o'') = 1,00$	$\delta(t_o'') = 0,85$ $\delta(t_z'') = 0,15$	$\delta(t_o'') = 0,50$; $\delta(t_z'') = 0,06$ $\delta(t_3'') = 0,37$; $\delta(t_p'') = 0,07$	$\delta(t_o'') = 0,95$ $\delta(t_p'') = 0,05$
Примітка. t_o'' – час дії навантаження при безперервному русі транспортних засобів; t_z'' – час дії навантаження від транспортних засобів, що гальмують, але не зупиняються; t_3'' – час дії навантаження при зупинці руху транспортних засобів; t_p'' – час дії навантаження від транспортних засобів, що набирають розгін.			

Такий характер комбінацій навантажень свідчить, що із збільшенням тривалості дії навантаження збільшується обсяг руйнувань.

У табл. 2 наведено відносний обсяг тріщиноутворення на правій крайній смузі руху шестисмугових вулиць і доріг в зоні світлофора у Києві.

Таблиця 2

Вид пошкодження	Показник тріщиноутворення на характерних ділянках			
	ДБ	ДГ	ДЗ	ДР
Сітка тріщин				
Відносна площа пошкодження	0,12–0,22	0,33–0,42	0,57–0,78	0,40–0,49
Тріщини поздовжні				
Відносна довжина розтріскування	0,08–0,16	0,24–0,32	0,55–0,74	0,38–0,45
Відносний сумарний обсяг розкритих поздовжніх тріщин	0,10–0,16	0,31–0,37	0,55–0,72	0,34–0,41

Відомо, що час дії навантаження впливає на термореологічні характеристики дорожньо-будівельних матеріалів конструкції дорожнього одягу залежно від їх складу і структури. Приймаючи відношення значень миттєвого і тривалого модуля пружності E_0/E_∞ , як показник термореологічної чутливості, дорожньо-будівельні матеріали можна розділити на чотири групи (табл. 3).

Групи дорожньо-будівельних матеріалів за термореологічною чутливістю (ТРЧ)

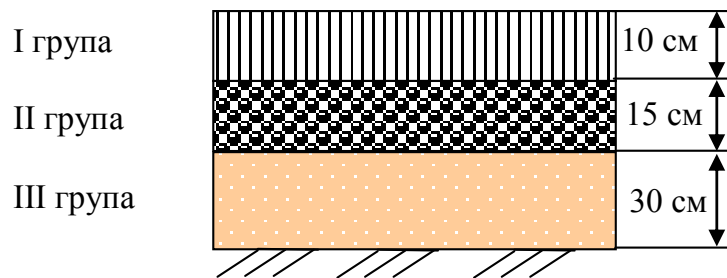
Види дорожньо-будівельних матеріалів за групами ТРЧ			
I (високочутливі)	II (чутливі)	III (помірночутливі)	IV (слабо чутливі)
Асфальтобетони всіх типів і видів, органомінеральні суміші тощо	Глинисті і пилуваті ґрунти земляного полотна, щебінь і гравій оброблені органічними в'язучими тощо	Щебінь, гравій, пісок необроблений або оброблений неорганічними в'язучими в кількості менше 5 %; піщані і супіщані ґрунти земляного полотна; крупноуламкові ґрунти і гравійно-піщані суміші, ґрунти земляного полотна, оброблені неорганічними в'язучими тощо	Щебінь, гравій, пісок, крупноуламкові ґрунти і гравійно-піщані суміші оброблені неорганічними в'язучими в кількості більше 5 %; пісний цементобетон тощо

Проведені дослідження свідчать, що для автомобільних доріг, де можливий сповільнений рух транспорту і зупинки, при використанні в основі дорожнього одягу матеріалів з меншою ТРЧ сприяє істотному збільшенню довговічності конструкції дорожнього одягу (у 2–5 і більше раз). Так, рівноцінні, традиційні за критеріями граничного стану конструкції дорожнього одягу (**рис. 3**) мають різну довговічність із збільшенням тривалості дії навантаження для різних за ТРЧ основ (**рис. 4**).

Висновок

При проектуванні конструкції дорожніх одягів, особливо для умов капітального ремонту, необхідно більш ретельно призначати критерії її граничного стану за якими потрібно виконувати розрахунок та враховувати термореологічну чутливість прийнятих дорожньо-будівельних матеріалів. Для автомобільних доріг і вулиць з важким та інтенсивним рухом, де є вірогідність заторів, повільного руху і зупинок, доцільно використовувати у шарах основи матеріали, що містять неорганічні в'язучі (цемент, металургійні шлаки тощо). Реалізація цієї концепції можлива при використанні сучасної технології холодної регенерації існуючого дорожнього одягу.

а)



б)

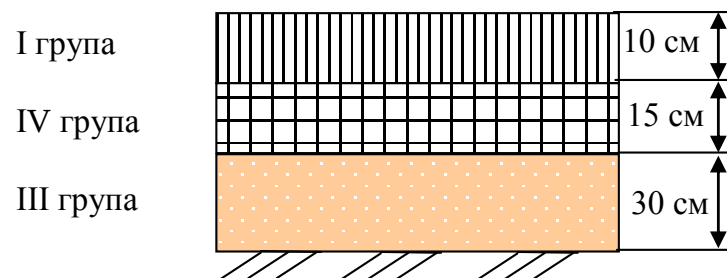


Рис. 3. Рівноцінні за традиційними критеріями граничного стану варіанти конструкцій дорожнього одягу: а – з основою з матеріалів підвищеної ТРЧ (1-й варіант); б – теж із зниженою ТРЧ (2-й варіант)

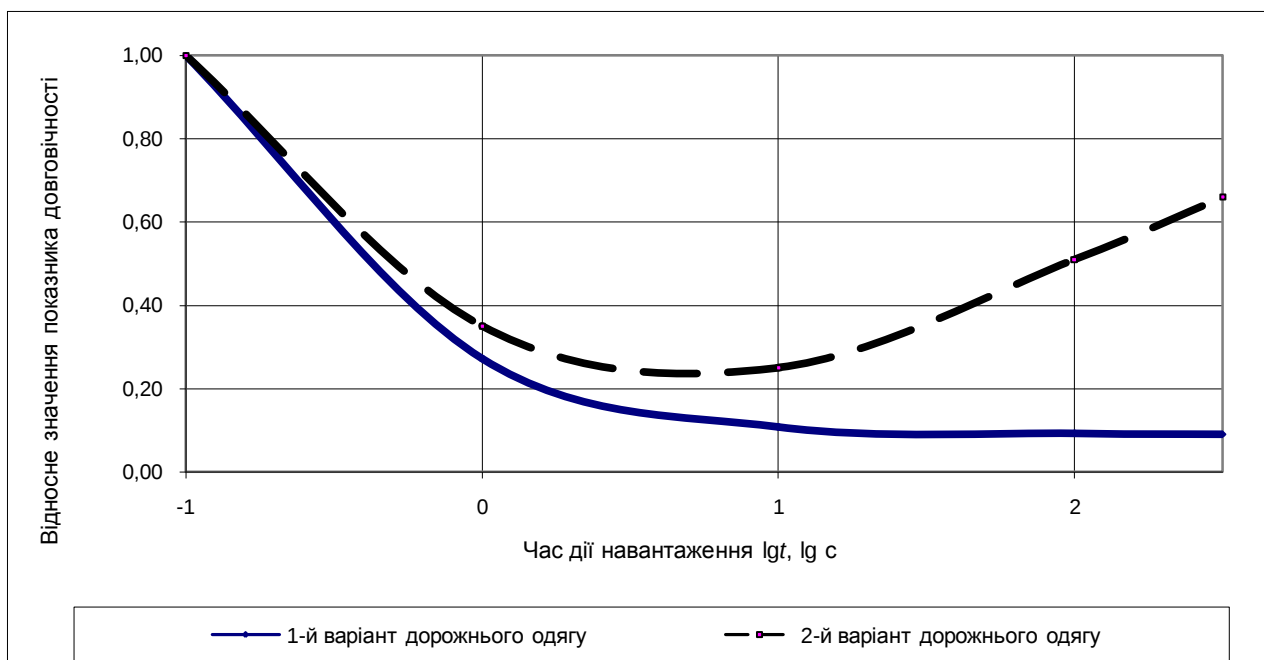


Рис. 4. Залежність довговічності асфальтобетонного покриття від часу дії навантаження при температурі 0 °С

ЛІТЕРАТУРА

1. *Бируля А.К.* Конструирование и расчет нежестких одежд автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1964.
2. *Радовский Б.С.* Теоретические основы конструирования и расчёта нежёстких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: Дис... докт. техн. наук. – К., 1983. – 552 с.
3. *Радовский Б.С., Супрун А.С., Козаков И.И.* Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. – К.: Будівельник. – 1989. – 168 с.
4. *Радовский Б.С.* Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. – К.: Полиграфконсалтинг, 2003. – 260с.
5. *Мерзликин А.Е.* Разработка и исследование методики рационального конструирования дорожных одежд (на примере цементогрунтового основания): Дис... канд. техн. наук: 05.23.14. – М., 1982. – 186 с.
6. *Мозговой В.В.* Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис... докт. техн. наук. – К., 1996. – 343 с.
7. *Ищенко А.М.* Разработка методики расчета на температурную трещиностойкость асфальтобетонного покрытия искусственных сооружений автомобильных дорог: Дис... канд. техн. наук. – К., 2003. – 180 с.
8. *Ладижинський І.С.* Підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних шарів за рахунок використання синтетичних сіток: Дис... канд. техн. наук. – К., 2005. – 185 с.
9. *Гамеляк И.П.* Основы обеспечения надежности конструкций дорожной одежды: Дис... докт. техн. наук. – К., 2005. – 550 с.
10. *Рудюк В.В.* Проектирование дорожных одежд многополосных городских улиц и дорог с учетом распределения транспортных нагрузок по проезжей части: Дис... канд. техн. наук: 05.23.14. – К., 1998. – 271 с.
11. *Бесараб О.М.* Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження: Дис... канд. техн. наук: 05.23.05. – К., 2003. – 252 с.
12. *Смолянець В.В.* Удосконалення проектування асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу в умовах міст: Дис... канд. техн. наук. – К., 2005. – 195 с.

Кулак Є.М.

ОБСТЕЖЕННЯ СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ПОКРИТТІВ ІЗ ЩМА

Анотація. Моніторинг автомобільних доріг на яких використовувались новітні технології, що показали перевагу в порівнянні із традиційними , та їх детальний аналіз.

Ключові слова: моніторинг, ЩМА, зчеплення, будівельні матеріали.

Аннотация. Мониторинг автомобильных дорог на которых использовались новейшие технологии, показавшие преимущество по сравнению с традиционными, и их детальный анализ.

Ключевые слова: мониторинг, ЩМА, сцепление, строительные материалы.

Abstract. Monitoring of highways on which the use of new technologies that have shown an advantage in comparison to traditional, and their detailed analysis.

Key words: monitoring, SMA, bonding, building materials.

В сучасних умовах недостатнього фінансування першочерговою задачею дорожнього господарства є збереження існуючої дорожньої мережі у задовільному технічному стані, а саме основні транспортно-експлуатаційні показники повинні бути на рівні нормативних вимог [1, 2]. Вирішити ці питання неможливо без застосування нових технологій та матеріалів, які дозволяють збільшити міжремонтні терміни та зменшити експлуатаційні витрати. Саме цими питаннями і займаються наукові та науково-дослідні організації (ДерждорНДІ, Дор'якість, Дортехнологія, НТУ, ХНАДУ) під керівництвом управління науково-технічної політики САД в Україні (Укравтодор).

В останні роки впроваджено такі технології як: щебенево-мастиковий асфальтобетон, холодний ресайклінг, геосинтетичні матеріали, тонкошарові покриття ЛЕМС. Деякі нові технології показали безумовну перевагу в порівнянні із традиційними. Так, наприклад, практика експлуатації ділянок покриття із ЩМА показує суттєве збільшення (до 7 років) міжремонтних строків та стабільний коефіцієнт зчеплення (до 0,4 - 0,45). При деякому збільшенні витрат при будівництві важливим показником експлуатаційної надійності покриттів із ЩМА є суттєве зниження об'ємів необхідних ремонтних робіт, що забезпечує скорочення витрат на утримання покриттів доріг приблизно до 25-40 %.

В ДерждорНДІ проводяться роботи з моніторингу ділянок автомобільних доріг, де застосовані нові технології. В таблицях 1-3 наведені транспортно-експлуатаційні показники деяких з них.

Таблиця 1 – Результати обстеження деформацій і руйнувань покриття (матеріали взяті з результатів обстеження ДерждорНДІ)

Назва а/д	Км, від - до	Наявні деформації				
		2005р.	2006р.	2007р.	2008р.	2009р.
Київ-Чоп	км 33 +476 – 33+976	відсутні		Поперечні тріщини		
	км 45+700 – 46+700	відображені тріщини, окремі бітумні плями		колія	Частково фрезування	
Київ-Харків-Довжанський	км 18 –32	відсутні				
	км 60 – 61	тріщини, лушення, окремі бітумні плями			Ямковість, тріщини	
Київ-Ковель	км 294 – 300	відсутні				
Кіпті-Глухів-Бачівськ	Км 0 +600 –52	-		Місцями колія	Місцями колія до 10 мм	Ремонт колії, деформації відсутні

Моніторинг показав задовільний стан поверхні покриття із ЩМА за такими ознаками, як відсутність вибоїн майже на всій протяжності, високу тріщиностійкість, лише на окремих ділянках виявлено лушення покриття, утворення колії. Обстеження показало високу стійкість до колієутворення при високих літніх температурах при значному транспортному навантаженні, в той час, як на ділянках покриття із традиційного асфальтобетону в багатьох місцях відмічається утворення колії.

Так, на ділянці автомобільної дороги Київ-Чоп, км 45+700 – км 46+700 виникли локальні місця колії довжиною до 50 м і максимальною глибиною до 40 мм, останнім часом проведено фрезування покриття.

На ділянці а/д Кіпті-Глухів-Бачівськ, км 0 – км 52 на покритті із ЩМА через рік після влаштування утворилась колія у вигляді поглиблень по смузі накату. Глибина колії становила від 5 до 11 мм. Краї колії згладжені, колія без випору, ознак пластичних деформацій не виявлено. Оскільки утворення колії зафіксовано в перший рік експлуатації і колія в подальшому не розвивалася, то можна сказати, що утворення колії може бути викликано доущільненням шарів дорожнього одягу. Також до причин утворення колії можна віднести той факт, що за неперевіреними даними щебенево-мастикові суміші мали підвищений вміст зерен лещадної форми. В місцях з найбільшою колією виконано ремонт покриття великими картами, на решті протяжності утворення колії не спостерігається.

Стабільність значення рівності покриття – одного з основних транспортно-експлуатаційних показників, який визначає технічний рівень і експлуатаційний стан автомобільних доріг на ділянках де влаштовано ЩМА, обумовлена відсутністю руйнувань у вигляді тріщин, вибоїн, сітки тріщин. Рівність покриття безпосередньо впливає на споживчі властивості автодоріг, зручність і безпеку дорожнього руху, ефективність перевезення вантажів і пасажирів.

Стан покриття та стабільність транспортно-експлуатаційних показників в значній мірі визначаються дотриманням рецептури та технології виконання робіт при будівництві ділянок покриття із ЩМА (з врахуванням якості робіт та використаних матеріалів). На ділянках, де проводилось відпрацювання технології, деформації утворились вже в перший рік експлуатації, що в подальшому призвело до утворення руйнувань (Київ-Харків-Довжанський, км 60 – 61 та Київ-Чоп, км 45+700 – 46+700) та зниження показників рівності. На решті обстежених ділянок деформації та руйнування відсутні, показники рівності стабільні і залишились на рівні попередніх років (табл.2).

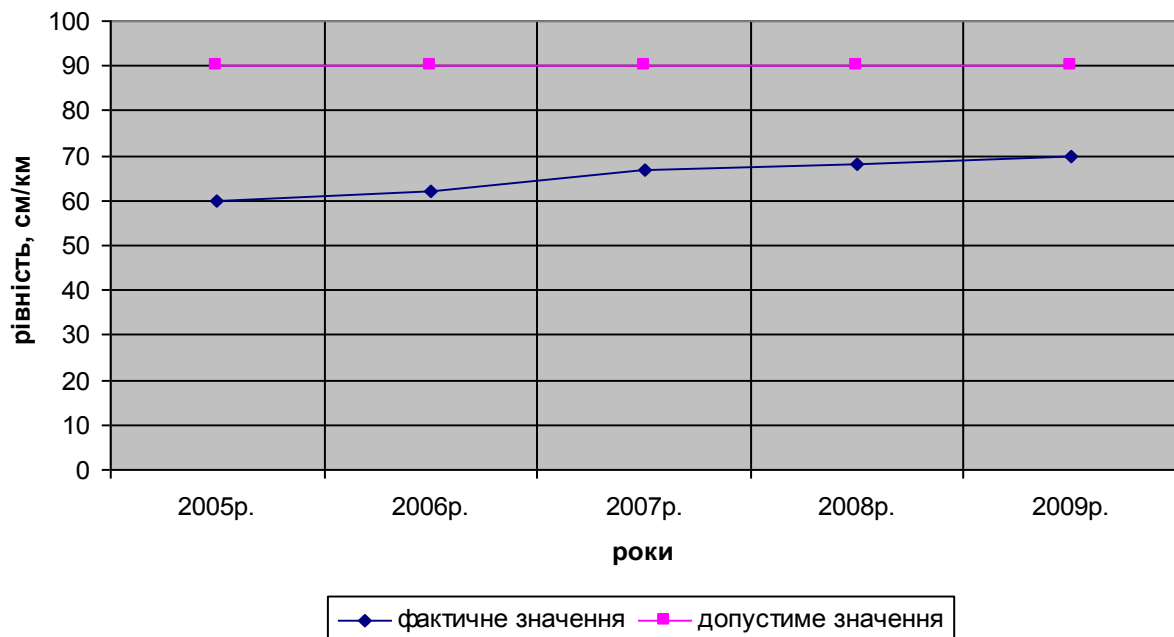
За 5 років експлуатації рівність покриття залишилась майже не змінною, вона не перевищує гранично допустиму норму, яка для першої категорії дороги згідно з технічними правилами П-Г.1-218-113:[2] (таб. 2.1) дорівнює 90 см/км. При забезпеченні належної (відповідної) рівності покриття швидкість

автомобілів не буде зменшуватись, що дасть змогу зменшити транспортні витрати.

Таблиця 2 – Відомість результатів вимірювання рівності покриття
(матеріали взяті з результатів обстеження ДерждорНДІ)

Назва а/д	Км, від - до	Рівність покриття, см/км				
		2005р.	2006р.	2007р.	2008р.	2009р.
Київ-Чоп	км 33 +476 – 33+976, право	51-60	52-62	62-67	60-68	60-70
	км 45+700 – 46+700	65-70	72 -80	72 -80	73-85	78-100
Київ- Харків- Довжанськ ий	км 18 –32	-	41-46	44- 50	43-51	40-50
	км 60-61	49-50	55-68	55-68	67-72	-
Київ- Ковель	км 294 – 300	-	30–38	30–38	31-40	-
Кіпті- Глухів- Бачівськ	км 0+600 – 52	-	-	-	28-30	27-31

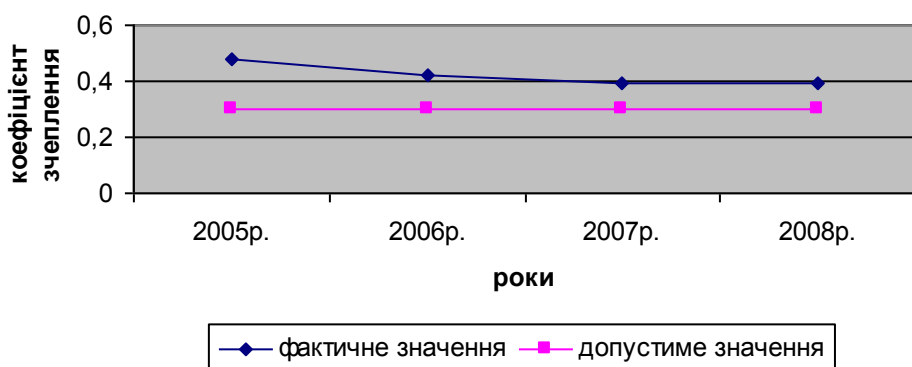
Рівність покриття на ділянці автомобільної дороги Київ -
Чоп км 33+476 - 33+976



Таблиця 3 – Відомість результатів вимірювання коефіцієнту зчеплення покриття (матеріали взяті з результатів обстеження ДерждорНДІ)

Назва а/д	Км, від - до	Коефіцієнт зчеплення			
		2005р.	2006р.	2007р.	2008р.
Київ-Чоп	км 33 +476 – 33+976, право	0,48	0,45-0,40	0,39	0,39-0,40
	км 45+700 – 46+700	-	0,37-0,40	0,40	0,37
Київ-Харків-Довжанський	км 18 –32	0,48	0,46-0,44	0,41-0,43	0,41-0,43
	км 60-61	0,51	0,46	0,37-0,40	-
Київ-Ковель	км 294 – 300	-	-	0,47-0,48	0,47-0,48
Кіпті-Глухів-Бачівськ	км 0+600 – 52	-	-	-	0,38-0,43

коефіцієнт зчеплення на ділянці автомобільної дороги Київ - Чоп км 33+476 - 33+976



Економічна ефективність застосування щебенево-мастикового асфальтобетону в порівнянні із традиційним досягається за рахунок збільшення міжремонтних строків експлуатації з 3-4 років до 7-8 згідно з табл. 2 ВБН Г.1-218-050 [3]. При цьому витрати на відновлення транспортно-експлуатаційних показників зменшується до 25 %.

Якщо шар асфальтобетону товщиною 4 см коштує орієнтовно 80грн/м² то для ділянки автомобільної дороги Київ – Чоп км 45+700 – 46+700 (площа покриття 7500м²) вартість влаштування покриття складала б 600000грн, а вартість влаштування ЦМА на цій ділянці становить приблизно 720000грн, що

на 20%, або на 120000грн більше. На даний час склалася така ситуація, що асфальтобетон не витримує нормативного терміну служби до капітального ремонту і експлуатаційні служби змушені виходити з цієї ситуації влаштовуючи тонкошарове покриття (вартість влаштування 1м^2 приблизно 25грн/ м^2), якщо перемножити на площу, вартість його буде становити 187500грн, а це становить 31,25% від загальної вартості влаштування асфальтобетонного покриття, і це не враховуючи вартості робіт при поточних ремонтах.

Крім того, економічний ефект від експлуатації покриттів із стабільною рівністю і шорсткістю можна отримати за рахунок збільшення швидкості руху, що призводить до зниження транспортних витрат, та відповідно зменшення транспортної складової у собівартості перевезень.

Висновок

Застосування технології ЩМА – на автомобільних дорогах спрямоване головним чином на підвищення довговічності дорожньої конструкції. Маючи меншу приведену вартість за рахунок подовження терміну служби конструкції з покриттям ЩМА, вона дорожча ніж традиційна з асфальтобетону.

Проведені обстеження та вимірювання ТЕП показали очевидну перевагу покриттів із ЩМА в порівнянні із традиційними асфальтобетонними покриттями за такими ознаками як відсутність деформацій, стабільна шорсткість і рівність покриття.

Аналіз результатів обстежень ділянок з ЩМА свідчить про те, що практично більшість дефектів, які утворилися на покритті пов'язані з недотриманням технології, або слабкою основою дорожнього одягу.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 3587 -97.
2. П-Г.1-218-113. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування.
3. ВБН Г.-1-218-050-2001. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування.
4. ВБН В.2-218-028:2005. Норми фінансування витрат на поточний ремонт та експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування.

Процик О.П., к.т.н.

ВИБІР СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ ЗАДАНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. В даній статті розглядається вплив дорожнього покриття на застосування спеціалізованого рухомого складу автомобільного транспорту при санітарній очистці населених пунктів.

Ключові слова: автомобіль, дорожнє покриття, перевезення, сміття.

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние дорожного покрытия на применение специализированного подвижного состава автомобильного транспорта при санитарной очистке населенных пунктов.

Ключевые слова: автомобиль, дорожное покрытие, перевозка, мусор.

Abstract. This article discusses the impact of pavement on the use of specialized rolling stock by road transport sanitary cleaning settlements.

Keywords: car, road surface, traffic, garbage.

Необхідно зазначити, що при наявності різних типів і марок автомобілів для виконання певних видів робіт потрібно комплексно розглядати питання використання як найбільш ефективних транспортних засобів по визначених критеріях, в тому числі і їх тип, що буде найбільш повно відповідати умовам експлуатації. Для прикладу розглянемо варіанти видалення твердих побутових відходів (ТПВ) в населених пунктах з асфальтобетонним дорожнім покриттям та ґрунтовими дорогами.

У населених пунктах збирання ТПВ здійснюють контейнерним та безконтейнерним методами. На вибір методу впливають умови проїзду сміттєвоза та його маневрування, технології збору ТПВ. Вибрана технологія поводження з ТПВ повинна забезпечувати повне та якісне очищення населених пунктів від відходів та забезпечувати мінімальні витрати на проведення даних робіт.

Одним з факторів впливу на зміну собівартості та продуктивності сміттєвозів є швидкість руху, на яку істотний вплив мають дорожні умови. При зміні стану дорожнього покриття змінюється швидкість транспортного засобу (рис. 1). В разі погіршення якості дороги та зменшенні швидкості руху збільшуються витрати пального, що відмічається в фаховій літературі [1].

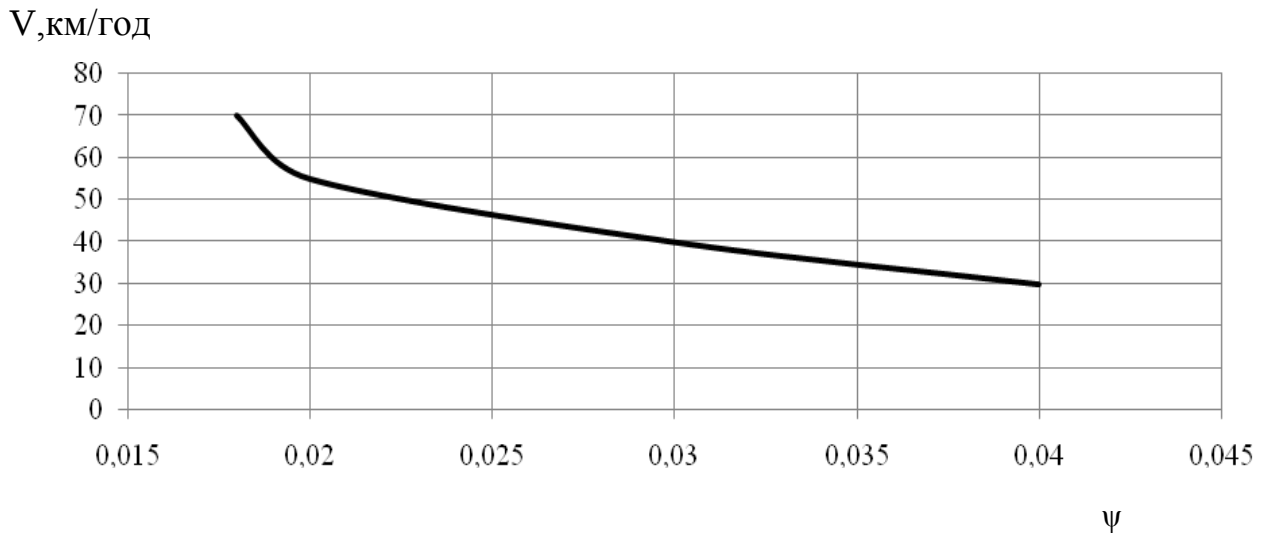


Рис. 1. Графік залежності швидкості руху від коефіцієнту опору коченню коліс

Врахування стану дорожнього покриття, також залежності продуктивності сміттєвозу (рис. 2) і собівартості перевезень (рис. 3) від щільності розселення жителів міста, вантажопідйомності сміттєвозу (q) та відстані між містом і полігоном (l) надає можливість вибору транспортного засобу, що найбільш повно відповідає заданим умовам прибирання, визначенню часу проведення робіт, розрахунку витрат пального та інше.

Виконані розрахунки на моделі вивозу ТПВ на полігон [2] вказують на нестійкий характер зміни добової продуктивності сміттєвозу, що викликана обмеженнями режиму праці та відпочинку екіпажів транспортних засобів.

Аналогічні розрахунки за показником собівартості перевезень вказують на монотонність зміни його значень, що дозволяє з більшою ступеню достовірності обґрунтовувати висновки.

Аналіз залежностей собівартості перевезень вказує, що найбільш ефективним є сміттевоз з максимально допустимою вантажопідйомністю для визначених умов перевезень.

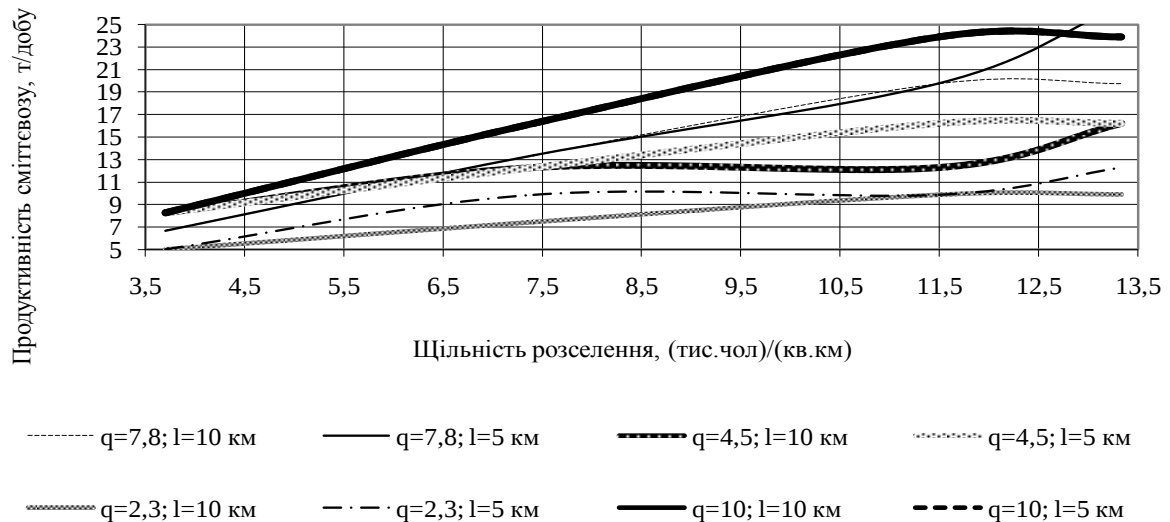


Рис. 2. Залежність продуктивності сміттевозу від щільності розселення жителів міста, вантажопідйомності сміттевозу (q) та відстані між містом і полігоном (l)

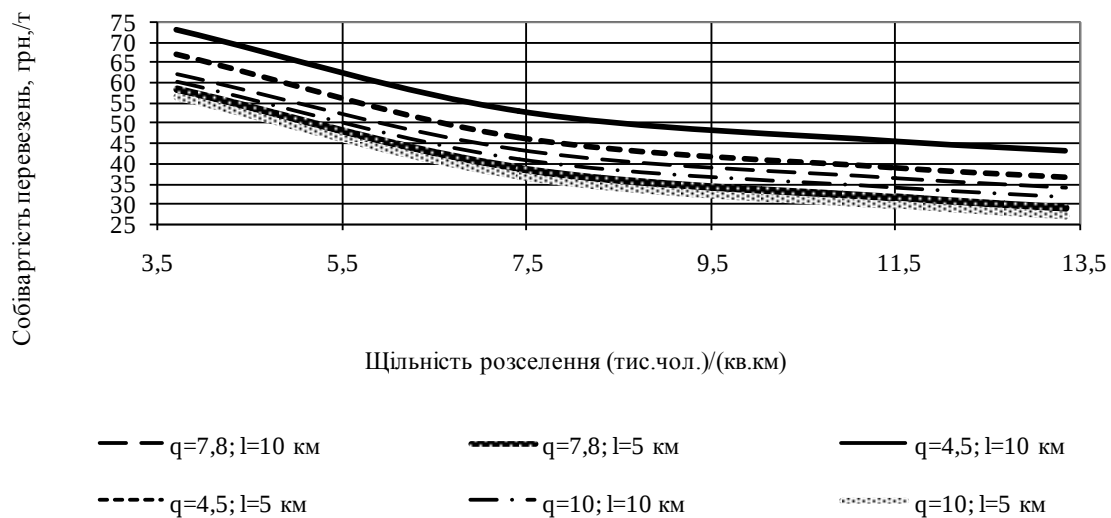


Рис. 3. Залежність собівартості перевезень від щільності розселення жителів міста, вантажопідйомності сміттевозу (q) та відстані між містом і полігоном (l)

В останній час в Україні значно зросла кількість дачних та садово-огородніх товариств, мешканці яких є суб'єктами права власності на ТПВ. Більшість вказаних поселень не обладнані твердим дорожнім покриттям, мешканці приїзжать періодично. Вказані фактори ускладнюють використання безконтейнерного методу збирання ТПВ, в зв'язку з відсутністю можливості постійного перебування на своїх ділянках багатьох мешканців, та контейнерного методу з використанням смітєвозів з заднім завантаженням, в зв'язку з утрудненим переміщенням контейнерів на колесах до кузова автомобіля. В багатьох випадках, поводження з ТПВ покладене на «плечі» мешканців даних поселень, відходи в кращому випадку перевозяться до найближчого контейнеру, в інших випадках складаються на несанкціонованих звалищах.

Враховуючи вищевказане, для дачних поселень пропонується використовувати контейнерний метод збирання ТПВ, використовуючи смітєвози з боковим завантаженням. Це дасть змогу проводити якісне збирання відходів з визначеною періодичністю, створить умови для зручного поводження з ТПВ мешканців дачних поселень.

Необхідно відзначити, що при плануванні системи поводження з ТПВ, стан дорожнього покриття відіграє одну з вирішальних ролей як на вибір методу збирання та перевезення відходів, так і на вибір транспортного засобу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Процик О. П.* Підвищення ефективності перевезень твердих побутових відходів : автореф. дис. На здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / О. П. Процик. — К.; 2009. — 17с.
2. *Говорущенко Н. Я.* Основы теории эксплуатации автомобилей / Н. Я. Говорущенко. — К.: Вища шк., 1971. — 232с.
3. *Наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України №6 «Про затвердження Рекомендації із розроблення схем санітарної очистки населених пунктів» від 10.01.2006 року* [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.ukrwaste.com.ua/content/s2/acts/files/nakt/18.htm>.

Соколова Н.М., к.е.н.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВИКОНАННЯ КОНТРАКТУ З УТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація. Пропонуються концептуальні передумови імітаційного моделювання процесу виконання контракту державно – приватного партнерства в експлуатації автомобільних доріг.

Ключові слова: автомобільна дорога, експлуатація.

Аннотация. Предлагаются концептуальные предпосылки имитационного моделирования процесса выполнения контракта государственно - частного партнерства в эксплуатации автомобильных дорог.

Ключевые слова: автомобильная дорога, эксплуатация.

Abstract. Proposed conceptual simulation process conditions of the contract public - private partnerships in service roads.

Keywords: Road, the operation.

Постановка проблеми. В останні два десятиріччя в економіці багатьох країн світу виникла особлива форма взаємодії бізнесу і влади - партнерство держави і приватного сектора: нова характерна риса сучасної змішаної економіки. В Україні державно-приватне партнерство (ДПП) відтепер ґрунтується на затвердженому у червні 2010 року Законі України «Про загальні засади державно-приватного партнерства». ДПП, на відміну від традиційних адміністративних відносин, створює свої базові моделі фінансування, відносин власності та методів управління. Особлива роль належить ДПП в реалізації інфраструктурних проектів, в тому числі автомобільних доріг. Про це свідчить прийняття Закону України «Про концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг».

Прийняті у світовій практиці класифікації ДПП виокремлюють такі його форми, як контракти, оренда, концесія, угоди про розподіл продукції, спільні підприємства. ДПП в сфері утримання і удосконалення дорожньої інфраструктури здійснюється через контракти, які засновані на показниках

забезпеченої якості стану автомобільних доріг, і контракти життєвого циклу [1,2,3]. Вони сприяють залученню в дорожні проекти приватного капіталу і стимулюють впровадження приватним сектором ефективного менеджменту та сучасних інноваційних технологій, що призводить до суттєвої економії фінансових ресурсів.

Розрахунок ключових характеристик подібного контракту уявляє собою складну техніко-економічну задачу. Сторонам контракту потрібно оцінити витрати та вигоди від реалізації контракту, майбутні економічні ризики, для чого потрібні адекватні природі економічних процесів ДПП моделі. В умовах фундаментальної невизначеності в майбутньому економічних процесів в якості найбільш адекватного типу моделей слід визнати імітаційні моделі, які в сфері економіки експлуатації автомобільних доріг ще не розроблені.

Аналіз останніх досліджень. Імітаційне моделювання - це метод дослідження, при якому досліджувана система замінюється моделлю, що з достатньою точністю описує реальну систему. З нею проводяться експерименти з метою отримання необхідної інформації. Експериментування з моделлю називають імітацією (імітація - це збагнення суті явища, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті). Моделі і методи імітаційного моделювання набули поширення у другій половині XX сторіччя. Теоретичні основи імітаційного моделювання були закладені в роботах багатьох вчених, наприклад, М.П.Бусленко, І.М. Коваленко, Д. Форрестер, Д. Гордон, Р. Шеннон, в економічних дослідженнях – Т. Нейлор, Д.Б. Хертц, Р. Брейлі, С. Майєрс, В.С. Жаров та інших. В області планування та організації робіт в будівництві, ремонті та утриманні автомобільних доріг слід відмітити роботи з імітаційного моделювання О.П. Каніна [5], які базувались на теорії складних систем М.П. Бусленко. Тим не менш, в сфері економічних досліджень проблем ДПП в експлуатації автомобільних доріг імітаційні моделі ще не розроблені.

Мета статті полягає в розробці концептуальних передумов імітаційного моделювання процесу виконання контракту ДПП в експлуатації автомобільних доріг.

Виклад основного матеріалу. Споживчі властивості дороги – це сукупність її транспортно-експлуатаційних показників, які безпосередньо впливають на ефективність і безпеку роботи автомобільного транспорту. Вони відображують інтереси користувачів доріг і вплив на навколишнє середовище: швидкість, безперервність, безпеку і зручність руху, пропускну здатність і рівень завантаження рухом; здатність пропускати автомобілі з дозволеними для руху осьовими навантаженнями, загальною масою і габаритами, а також

екологічну безпеку. Транспортно-експлуатаційний стан дороги (ТЕС) – це комплекс фактичних значень параметрів і характеристик технічного рівня і експлуатаційного стану на поточний момент, які забезпечують її споживчі властивості та якість дороги - ступінь відповідності комплексу показників технічного рівня, експлуатаційного стану, інженерного обладнання та облаштування, а також рівня утримання нормативним вимогам.

Споживчі властивості дороги задовольняються тим краще, чим вище ТЕС, однак підтримка ТЕС на високому рівні вимагає більших витрат фінансових ресурсів, які, звісно, завжди обмежені. Таким чином, маємо задачу оптимізації: при збільшенні витрат на утримання дороги покращується її ТЕС та зменшуються витрати користувачів дороги і навпаки

$$B(S) = B_t(S) + B_d(S) \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де S – стан дороги;

B_t – транспортні витрати;

B_d – дорожні витрати, $B_d \leq \Phi$.

Дорожні витрати обмежені можливістю Φ держави (в особі державної дорожньої служби) фінансувати підтримку дороги в найвищому стані, тому в контракті ДПП слід обумовити такий плановий стан дороги S , який забезпечує умову $B_d \leq \Phi$. Отже в імітаційній моделі, перш за все, потрібно прогнозувати стан дороги.

Стан дороги S формується дією трьох головних процесів:

1) зміною інтенсивності дорожнього руху, яка зумовлює зміну показника завантаження дороги рухом і може призвести до необхідності реконструкції дороги, а також впливає на знос дороги;

2) деградації властивостей елементів доріг під впливом повторюваного транспортного навантаження, природних, техногенних та антропогенних факторів, внутрішніх чинників;

3) виконання робіт з реконструкції, ремонту та утримання дороги. Цей процес уявляє собою управління станом дороги.

Моделювання змін середньорічної середньодобової інтенсивності руху уявляє собою складну задачу, тому що не можна на основі дуже коротких рядів спостереження інтенсивності руху, які фактично мають місце для більшості доріг України, виконати статистично значимий прогноз на багато років вперед. На наш погляд, більш адекватною для прогнозування інтенсивності руху може бути методика, запропонована в роботі [6].

Сутність методики полягає у визначенні ймовірної кількості автотransпортних засобів, що здійснюють поїздки між парами кореспондуючих

населених пунктів розглянутої території, кореспонденції між якими є значимими. При цьому розрахунок інтенсивності руху зводиться до формування потоків наявного або перспективного парку автотransпортних засобів на відповідній мережі автомобільних доріг. Ця методика базується на так званій «гравітаційній моделі», де інтенсивність руху визначається через кількість населення зони тяготіння дороги, рівень насичення території автомобілями, відстань між населеними пунктами, швидкість руху та інші параметри. В такій моделі потрібно прогнозувати чисельність населення та рівень насичення території автомобілями, статистика яких значно більша ніж статистика спостережень інтенсивності руху. Моделювання може здійснюватись за допомогою апарату нечітких нейронних мереж.

Деградація стану доріг може моделюватись виходячи з наступних міркувань. Мережа автомобільних доріг уявляє собою ієрархічну систему (рис. 1).

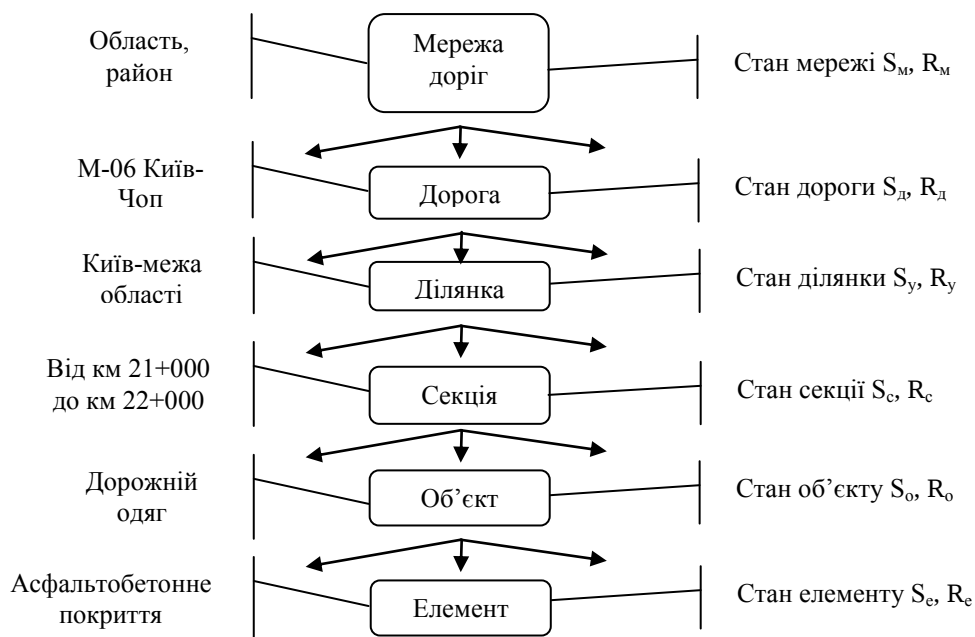


Рис. 1 Мережа доріг як ієрархічна система

Стан мережі визначається узагальненням стану елементів доріг з урахуванням їх важливості та інтенсивності руху на окремих ділянках доріг. Кожний елемент дороги протягом життєвого циклу (до заміни) перебуває послідовно в одному з n експлуатаційних станів, які характеризуються інтервалами рейтингу, наприклад, за 100-бальною шкалою. Рейтинг стану елементу дороги в балах визначається на основі спостережених рівня серйозності і рівня розповсюдження пошкоджень елементу. Час перебування елементу в певному експлуатаційному стані – випадкова величина, що

залежить від факторів, які обумовлюють процес деградації елементу, або від виконання ремонтних робіт. Припускається, що різні за структурою та вартістю ремонтні роботи здійснюються (або не здійснюються) в залежності від номеру стану, а після ремонту стан елементу дорівнює 1, тобто найкращий. Граф переходів елементу показано на рис. 2.

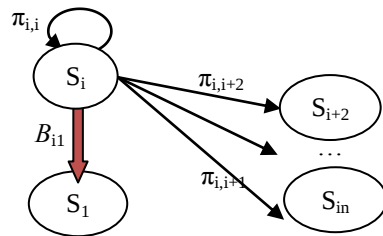


Рис. 2 Граф переходів стану елементу. π_{ij} – імовірність переходу з i -го стану до j -го стану, B_{i1} – витрати на ремонт та штрафи: $B_{21} < B_{31} < \dots < B_{n1}$

Витрати, пов'язані з ремонтом дороги:

$$B_d = B_p + B_{ш}, \quad (2)$$

де B_p – вартість ремонту;

$B_{ш}$ – вартість штрафів за несвоєчасне приведення стану елементу до обумовленого в контракті.

Модель деградації елемента, тобто перехід із одного експлуатаційного стану в інший – це стохастичний процес з простором станів $S(t_n) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Стан $S(t_{n+1})$ в момент часу t_{n+1} залежить тільки від $S(t_n)$ і не залежить від передісторії процесу. Перехідні імовірності π_{ij} повинні визначатись експертною процедурою як нечіткі імовірності, тому що на сьогодні відсутні статистичні дані про такі імовірності.

Імітація зміни стану елементу здійснюється з механізмом системного часу « Δt » [7]. Час моделювання T розбивається на N інтервалів тривалістю Δt (один рік).

Алгоритм моделювання змін стану елементу в інтервалі часу T включає такі кроки:

- 1) задається початковий стан S_i на початку системного часу;
- 2) нараховується системний час $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. Якщо $i+1 > N$, то перехід до кроку 5;
- 3) методом Монте-Карло за допомогою нечітких перехідних імовірностей визначається наступний стан елементу S_{i+1} та розігрується можливість катастрофічної події - в цьому випадку елемент переходить в стан S_n ;
- 4) перевіряється чи потрібний ремонт елементу, притаманний стану S_{i+1} . Якщо потрібний, то фіксуються витрати на ремонт, стан елементу

встановлюється S1 і здійснюється перехід до кроку 2, інакше перехід до кроку 2;

5) обробка і фіксація результату прогону моделі.

Для коректної статистичної обробки здійснюється потрібна кількість прогонів, тому що один прогон моделі – один результат спостереження. В результаті статистичної обробки результатів моделювання будується інтегральна функція розподілу рейтингу елементу, яка залежить від вибраної стратегії утримання елементу дороги, та можуть бути обчислені різні статистичні параметри.

Витрати на ремонт і утримання доріг здійснюються в різні періоди часу, тому для порівняння варіантів рішень, подібно інвестиційним проектам, потрібно обчислювати приведені витрати з використанням процедури дисконтування, маючи на увазі, що метод чистої приведеної вартості має недоліки, які проявляються при оцінці довгострокових проектів [8].

Висновки. Імітаційна модель – найбільш реальний інструмент оцінки витрат на реконструкцію, ремонти та утримання автомобільних доріг в умовах невизначеності. Для її реалізації потрібна розробка, перш за все, нечіткої нейронної моделі прогнозування інтенсивності руху та процедур експертного визначення перехідних імовірностей на основі теорії нечітких множин.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Содержание и улучшение дорожной инфраструктуры с помощью контрактов, основанных на показателях качества работ* / Н. Станкевич, Н. Кюреши, Ц. Кейроз // Транспортный бюллетень TN-27. – Вашингтон (США): Всемирный банк. – Сентябрь, 2005. – 14 с.
2. *Черниговский М.* Контракты жизненного цикла: правовая природа и перспективы использования в рамках ГЧП-проектов в России. // Корпоративный юрист, № 5, 2009.- с.14-18.
3. *Implementing Performance-based Road Management and Maintenance Contracts in Developing Countries - An Instrument of German Technical Cooperation* – By Dr. Gunter Zietlow. Eschborn, November 2004. - 19 с.
4. *Вітлінський В. В.* Аналіз, моделювання та управління економічним ризиком / В. В. Вітлінський, П. І. Верченко. – К. : КНЕУ, 2000. – 292 с.
5. *Канин А.П.* Моделирование производственных процессов строительства и ремонта автомобильных дорог / Карай Н.А. – М.: Транспорт, 1990. – 120 с.
6. *Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах.* ОДМ ОАО "ГИПРОДОРНИИ"М.: 2003. - 70 с.
7. *Таха, Хемеди А.* Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. С англ.-М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
8. *Галасюк Валерий, Сорока Мария, Галасюк Виктор.* Понятие экономического риска в контексте концепции CCF//Вестник бухгалтера и аудитора Украины.- 2002.-№15-16.- С.26-34.

Харченко А.М.

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ РІЧНОЇ ПРОГРАМИ ДОРОЖНЬО-РЕМОНТНИХ РОБІТ

Анотація. У статті наведено аналіз останніх досліджень шляхів удосконалення річної програми дорожньо – ремонтних робіт, та їх удосконалення шляхом застосування експертної системи проектування.

Ключові слова: проектування, дорога, ремонт.

Аннотация. В статье приведен анализ последних исследований путей совершенствования годовой программы дорожно - ремонтных работ, и их усовершенствования путем применения экспертной системы проектирования.

Ключевые слова: проектирование, дорога, ремонт.

Abstract. The article presents analysis of recent research ways of improving the annual program of road - repair work, and their improvement through the use of expert WebBuilder Please design.

Keywords: design, road repair.

Постановка проблеми

Задача проектування річної програми робіт з ремонту та утримання автомобільних доріг має велике народногосподарське значення. Науково-обґрунтоване рішення цієї задачі сприяє забезпеченню високого транспортно-експлуатаційного рівня стану доріг та скорочення витрат на перевезення вантажів і пасажирів. Річна програма робіт і її бюджетне забезпечення – найбільш реальний інструмент управління проектами та програмами експлуатації доріг.

Аналіз останніх досліджень

В діючій на практиці системі проектування річної програми робіт дорожніх організацій відсутня оцінки потенційного і фактичного впливу робіт з ремонту та утримання доріг на стан мережі автомобільних доріг, рівень інформаційного забезпечення процесу підготовки прийняття рішень недостатній, розглядається незначна кількість альтернатив ремонтних робіт, використовуються

фрагментарні і не комплексні програмні засоби опрацювання вихідних даних для обґрунтування управлінських рішень.

Мета роботи

Удосконалення методів проектування річної програми дорожньо-ремонтних робіт шляхом застосування експертної системи проектування.

Викладення основного матеріалу

Проектування річної програми робіт можна розглядати на двох рівнях. По-перше, потрібно визначити річну потребу в ремонтах та утриманні доріг на рівні дорожньої мережі для обґрунтування розмірів фінансування з боку Державної служби автомобільних доріг України. По-друге, потрібно конкретизувати річні об'єми робіт: відібрати найбільш ефективні проекти ремонтів і встановити максимально можливий при заданих обмеженнях рівень обслуговування доріг.

Головними характеристиками річної програми робіт відносяться перелік і річні об'єми робіт, які визначають потребу всіх видів потрібних для їх виконання ресурсів. Об'єми робіт та їх структура визначають необхідну виробничу потужність дорожньої організації [1].

Потенційні об'єми ремонтних робіт визначаються ступенем відхилення фактичного стану доріг від нормативного. Експлуатаційний стан характеризує здатність дороги забезпечувати її споживчі якості. Під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, що здебільшого мають імовірнісну природу, виникають і прогресують пошкодження елементів дороги, і стан дороги поступово погіршується. Беручи до уваги складний і багатовимірний простір спостережених пошкоджень, експлуатаційний стан оцінюється за допомогою безрозмірних шкал рейтингу на основі узагальнення впливу різних пошкоджень. У більшості випадків в таких шкалах рейтингу стану виділяють 3-7 рівнів, згідно з яким призначається відповідний вид ремонтного заходу.

Річну програму робіт необхідно розглянуто як сукупність проектів ремонту та утримання мережі автомобільних доріг. Ці проекти стосовно окремої дороги можна визначити як керуючі дії в управлінні проектом експлуатації дороги – фази життєвого циклу дороги, коли вона виконує своє функціональне призначення – забезпечує перевезення пасажирів та вантажів з заданими транспортно-експлуатаційними якостями (рівнем безпеки, швидкістю, комфортом і естетикою) (рис. 1).

З позицій загальної теорії управління мета управління проектом експлуатації дороги полягає у підтримці заданого стану дороги відповідно до змін параметрів транспортного потоку протягом фази експлуатації.

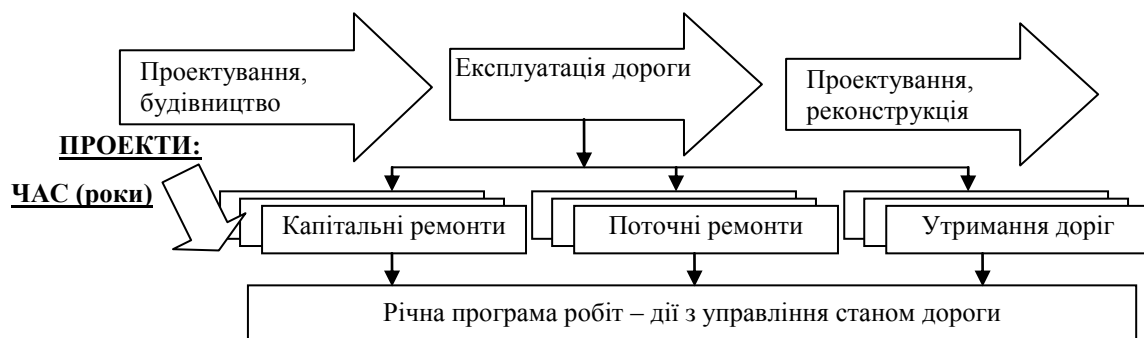


Рис. 1. Управління проектом експлуатації автомобільної дороги

Для досягнення мети управління організуються спеціальні зовнішні дії (ремонтні роботи), які формуються дорожньою організацією за відомим алгоритмом на основі завдання про мінімально допустимий рівень стану дороги і даних моніторингу стану (зворотного зв'язку). Таким чином, експлуатаційний стан дороги – головний параметр управління. Схема проектування річної програми робіт на основі управління станом доріг наведена на рис. 2.

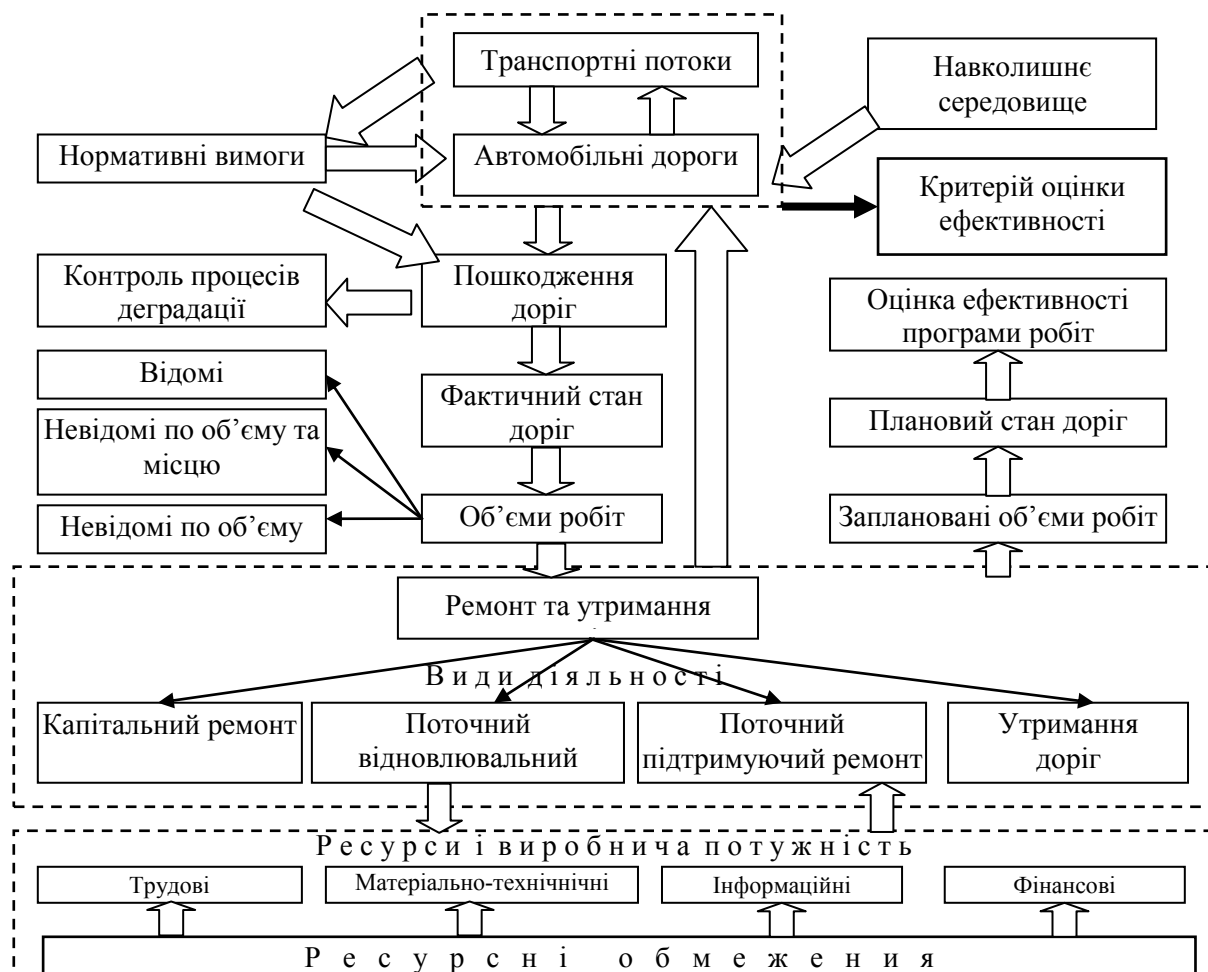


Рис. 2. Схема формування річної програми робіт

Експлуатаційний стан дороги являє собою результат двох протилежних процесів: процесу розвитку пошкоджень елементів доріг і процесу ліквідації пошкоджень шляхом виконання робіт з ремонту та утримання доріг. Стан визначається наявністю і характером пошкоджень елементів доріг.

В кожний момент часу елемент дороги перебуває в одному з експлуатаційних станів (таблиця 1) [3]. Оцінка характеру та розмірів пошкоджень повинна проводитись за такими показниками як:

- рівень серйозності зі шкалою: низький (Н), середній (С), високий (В);
- рівень розповсюдження зі шкалою: незначний (Н), помірний (П), значний (З).

Досягнення параметрами елементів граничних нормативних значень (рівня втручання [2]) зумовлюють необхідність виконання певних дорожніх робіт.

Таблиця 1

Загальна характеристика експлуатаційних станів

Експлуатаційний стан	Назва стану	Границі рейтингу стану елементу, балів
Стан 1	Відмінний	понад 80 до 100 включно
Стан 2	Добрий	понад 60 до 80 включно
Стан 3	Задовільний	понад 40 до 60 включно
Стан 4	Поганий	понад 20 до 40 включно
Стан 5	Аварійний	понад 0 до 20 включно

Модель річної програми робіт доцільно будувати на основі імовірнісного підходу. Стохастична модель – динамічна модель, у якій процес деградації елементів доріг стохастичний (природньо – напівмарковський). Існує багато факторів: погодні умови, рівні транспортних потоків, характеристики матеріалів, - які роблять процеси деградації елементів доріг імовірнісними за своєю природою.

Хоча в багатьох дослідженнях та методиках розрахунку ефективності ремонтів пропонується використовувати критерій мінімуму дорожньо-транспортних витрат, при його розрахунку виникають суттєві інформаційні та методологічні проблеми, що стосуються визначення його окремих складових, зокрема транспортної складової. Крім того, цей критерій дуже важко контролювати. Тому більш реальним і практично обґрунтованим може бути критерій максимізації експлуатаційного стану мережі доріг, який може бути забезпечений в умовах ресурсних обмежень.

Формулювання задачі

Мережа доріг складається з доріг **D** різних категорій визначеної протяжності **L**. Дороги діляться на більш-менш однорідні ділянки – секції

довжиною 1 км, як це прийнято в БОС, К. Кожна секція включає елементи з множини Е.

Індекси:

d – номер дороги, $d = 1, \dots, D$;

k – номер секції, $k = 1, \dots, K$;

e – номер елемента дороги зі списку елементів доріг, $e = 1, \dots, E$;

a – варіант ремонтних робіт, $a = 1, \dots, A$;

r – номер ресурсу необхідного для виконання робіт, $r = 1, \dots, N$;

s, i, j – номер стану елемента, $1, \dots, 5$.

Параметри моделі:

IP_{ds} – індекс руху на дорозі d в секції k;

R_{dkesa}^e – рейтинг стану e –го елемента, що досягає стану s після виконання альтернативи робіт a;

C_{dkesa} – вартість виконання альтернативи робіт a з ремонту e –го елемента на дорозі d в секції k;

RE_{dkesa} – потреба в ресурсах r-го типу виконання альтернативи робіт a з ремонту e –го елемента на дорозі d в секції k;

B – загальна вартість робіт (бюджетні асигнування);

RE_r – наявність r-го виду ресурсу;

P_{dkesaj}^e – імовірність переходу e –го елемента на дорозі d в секції k в стан j після виконання робіт альтернативи a, якщо елемент знаходився в стані s;

δ_s^e – максимальний об'єм елемента в недопустимому рівні стану;

ω_j^e – мінімальний об'єм елемента в допустимому рівні стану;

Змінні рішення:

X_{dkesa} – об'єм елемента e на дорозі d секції k в стані s, що потребує виконання роботи з варіантом a.

Конкретизуємо функцію цілі:

$$Z = \sum_d \sum_k \sum_e \sum_a (R_{dkesa}^e \times X_{dkesa} \times IP_{dk}) \Rightarrow \max \quad (1)$$

Обмеження:

а) з вартості робіт

$$\sum_d \sum_k \sum_e \sum_a (X_{dkesa} \times C_{dkesa}) \leq B \quad (2)$$

б) динамічні зміни в стані деградації елементу (напівмарковський процес)

$$\sum_a X_{dkeja} = \sum_s \sum_a (X_{dkesa} \times P_{dkesaj}), \forall d, k, j \quad (3)$$

в) ресурсні

$$\sum_d \sum_k \sum_e \sum_a \sum_i (X_{dkesa} \times RE_{dkesai}) \leq RE_i, i = \overline{1, N} \quad (4)$$

г) специфікація умов деградації елементу мережі

$$\sum_d \sum_k \sum_a X_{dkesa} \leq \delta_s^e, \forall e, \quad \text{якщо } s \text{ недопустимо} \quad (5)$$

$$\sum_d \sum_k \sum_a X_{dkeja} \leq \omega_j^e, \forall e, \quad \text{якщо стан } j \text{ допустимий} \quad (6)$$

д) невід'ємність

$$X_{dkesa} \geq 0, \forall d, k, e, s, a \quad (7)$$

Основними задачами реалізації моделі проектування річної програми робіт на основі розроблених теоретичних підходів є створення комп'ютерної бази даних як інформаційної моделі експертної системи та розробка програмного забезпечення, за допомогою якого буде можливим редагування бази даних, виведення алгоритмів розрахунку та пред'явлення користувачу необхідної інформації про річну програму робіт.

Експертна система уявляє собою спеціалізоване програмне та інформаційне забезпечення, яке містить знання експертів з питань планування робіт в дорожній галузі та має здатність робити логічні висновки на основі цих знань, забезпечуючи вирішення специфічних завдань, зокрема, проектування річної програми робіт. Структура експертної системи наведена на рис. 3.

База знань в експертній системі проектування річної програми дорожньо-ремонтних робіт включає: функції належності рівнів серйозності і розповсюдження пошкоджень; дані про варіанти робіт з ремонту та утримання доріг, які відповідають певним станам елементів доріг.

База даних включає: дані про наявність елементів доріг, їх об'єми та розміщення; дані про спостережені пошкодження елементів доріг, отримані в результаті моніторингу стану доріг.



Рис. 3. Структура експертної системи

Під час вирішення окреслених задач необхідно спиратись на сучасні існуючі бази даних та програмне забезпечення, яке використовується в дорожній галузі у сучасних умовах (програмні комплекси СУСП, АЕСУМ, СУПРУД, АРМ-СК).

Інструментарієм до зниження трудомісткості розробки програмного забезпечення експертної системи проектування річної програми дорожньо-ремонтних робіт (ЕСПР) є використання вже наповнених баз даних про наявність і поточний стан автомобільних доріг.

Необхідно вмонтувати в існуючі бази даних і програмні комплекси нові принципові доповнення, що реалізують функціональність ЕСПР.

ЛІТЕРАТУРА

1. Файнгольд М.Л., Кузнецов Д.В. Принципы расчета производственной мощности и загрузки оборудования. – Владимир, 2002.- 86 с.
2. Road Maintenance performance Contracts. Volume 3. Guidelines for Undertaking Routine Maintenance. Fourth Edition. Queensland Department of Main Roads, 2001 – 226 p.
3. Методика планування річних обсягів робіт з поточного ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг. М 218-02070915-653:2008.

Василишена Л.О.

ДОЦІЛЬНІСТЬ БУДІВНИЦТВА ПЕРЕХІДНО-ШВИДКІСНИХ СМУГ (ПШС) НА ДОРОЖНІХ РОЗВ'ЯЗКАХ В РІЗНИХ РІВНЯХ

Анотація. Основна мета даної роботи полягає у розрахунках величин інтервалів часу для виконання маневрів транспортними засобами. Відомо, що збільшення інтенсивності на головній дорозі веде до зростання затримок на з'їздах. Також обґрунтовано необхідність влаштування перехідно-швидкісних смуг на дорожніх розв'язках в різних рівнях.

Ключові слова: перехідно-швидкісна смуга, інтенсивність, дорожні розв'язки в різних рівнях.

Аннотация. Основная идея данной работы заключается у расчетах значений времени для осуществления маневров транспортными средствами. Известно, что увеличение интенсивности на главной дороге ведёт к росту задержек на съездах. Также обосновано необходимость устройства переходно-скоростных полос на дорожных развязках в разных уровнях.

Ключевые слова: переходно-скоростная полоса, интенсивность, дорожные развязки в разных уровнях.

Annotation. The main objective of this work is the calculation of the value intervals of time for maneuvering vehicles. It is known that increasing the intensity of the main road leading to growth delay at the congress. Also the necessity of arranging transitional speed traffic lanes on the solution of different levels.

Key words: transitional zone speed, intensity, traffic interchanges at different levels.

На дорожній розв'язці автомобілі виконують такі маневри: проїзд прямо, лівий поворот, правий поворот при в'їзді на головну дорогу та правий поворот при з'їзді з головної дороги.

Для безпечного вливання транспортного потоку із з'їзду на магістраль є наявність необхідного безпечного інтервалу (T).

Правий поворот при в'їзді на головну дорогу відбувається за схемою, що приведена на рисунку 1.1:

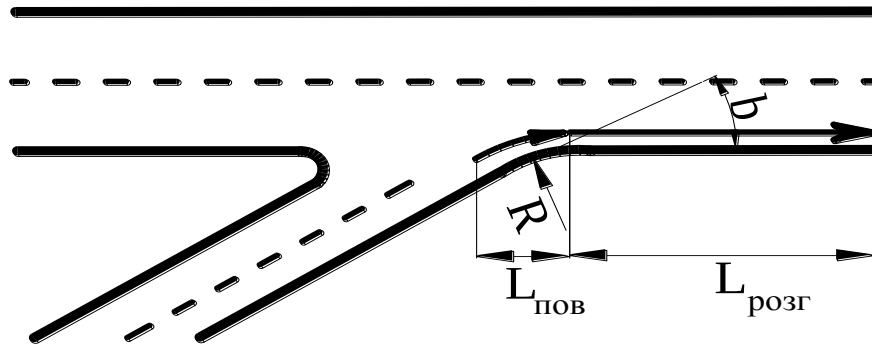


Рис. 1.1 – Правий поворот з другорядної дороги на магістраль

Для виконання цього маневру транспортний потік проходить 2 відстані:
– відстань, необхідну для здійснення правого повороту по кривій (L_1):

$$L_1 = \frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot b, \quad (1.1)$$

де R - радіус з'їзду (при повороті на головну дорогу), м;

b - кут при здійсненні повороту, град;

– відстань, необхідну для здійснення розгону від швидкості на з'їзді до середньої швидкості на магістралі (L_2), при $a = 1,2 \text{ м/с}^2$:

$$L_2 = \frac{V_{\text{ГОЛ}}^2 - V_{\text{ДРУГ}}^2}{254 \cdot a_{\text{РОЗГ}}}, \quad (1.2)$$

де $V_{\text{ГОЛ}}$ – середня швидкість руху на головній дорозі (магістралі), м/с;

$V_{\text{ДРУГ}}$ – швидкість руху на другорядній дорозі (тобто з'їзді), м/с;

$a_{\text{РОЗГ}}$ - середнє прискорення автомобіля при розгоні, $a_{\text{РОЗГ}} = 1,2 \text{ м/с}^2$.

Час проїзду кривої (t_1) та час, необхідний для розгону (t_2) визначаємо за формулами:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_{ДРУГ}}, (1.3)$$

$$t_2 = \frac{V_2 - V_1}{a_{РОЗГ}}, (1.4)$$

Загальний час, необхідний для виконання маневру:

$$T = t_1 + t_2 + t_{\text{дингаб}} + t_{\text{min}}, (1.5)$$

де $t_{\text{дингаб}}$ - інтервал, необхідний для «вклинювання» в основний потік, с;

t_{min} - мінімальний безпечний інтервал між автомобілями, с, який можна визначити за формулою:

$$t_{\text{min}} = 3,6 \cdot \frac{(1 + l_{\text{авт}}) \cdot e^{\frac{V_{\text{ГОЛ}}}{V_0}}}{V_{\text{ГОЛ}}}, (1.6)$$

де $l_{\text{авт}}$ - середня довжина автомобіля у транспортному потоці, м;

e – основа натурального логарифму;

V_0 – швидкість на дорозі, що відповідає пропускній здатності дороги.

Інтенсивність на дорозі (для забезпечення необхідного інтервалу) можна визначити за формулою:

$$N_V = \frac{1000 \cdot V_{\text{ГОЛ}}}{(1 + l_{\text{авт}}) \cdot e^{\frac{V_{\text{ГОЛ}}}{V_0}}}, (1.7)$$

де l – мінімальна дитанція між автомобілями у транспортному потоці, м.

Інтенсивність на другорядній дорозі (з'їзді) можна визначити за формулою:

$$N = \frac{3600}{T} (1.8)$$

Якщо інтенсивність на головній дорозі буде більшою (за розрахунками, наведеними вище), то транспортний потік з другорядної дороги не вплиється

безперешкодно в основний потік (тобто, будуть виникати затримки). В такому випадку, необхідно буде влаштовувати перехідно-швидкісну смугу (ПШС).

Розглянемо в'їзд автомобілів на головну дорогу з перехідно-швидкісних смуг (ПШС), схема здійснення маневру показана на рис. 1.2

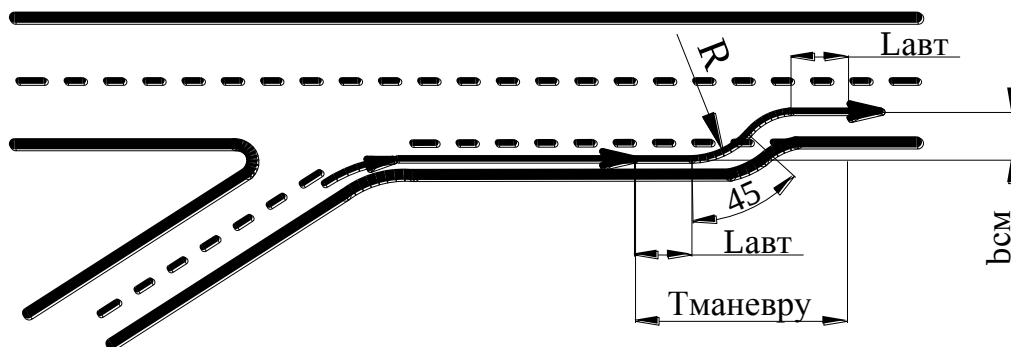


Рис. 1.2 - Правий поворот з другорядної дороги на магістраль за допомогою перехідно-швидкісних смуг

Час маневру складається з часу проїзду середньої довжини автомобіля, ширини смуги руху та двох довжин дуги, тобто:

$$T_{\text{МАН}} = t_{\text{авт}} + t_{\text{см}} + 2 \cdot t_{\text{дуги}} + t_{\text{мін}} \quad (1.9)$$

Час проїзду середньої довжини автомобіля визначається за формулою:

$$t_{\text{авт}} = \frac{L_{\text{СЕР}}}{V_{\text{ГОЛ}}}, \quad (1.10)$$

де $L_{\text{СЕР}}$ - середню довжину автомобіля в транспортному потоці, що визначається за допомогою формули:

$$L_{\text{СЕР}} = 4,2 \cdot a + 7,0 \cdot b + 10,5 \cdot c + 12,0 \cdot d, \quad (1.11)$$

де 4,2;7,0;10,5;12,0 – середня довжина відповідно легкових, вантажних автомобілів, автобусів та авто потягів, м.

a, b, c, d – склад руху відповідно легкових, вантажних автомобілів, автобусів та автопотягів, %

Час проїзду ширини смуги руху визначається як:

$$t_{cm} = \frac{b_{cm}}{V_{ГОЛ}}, \quad (1.12)$$

де b_{cm} - ширина смуги руху, м

Час проїзду довжини дуги, необхідної для вливання в транспортний потік на головній дорозі (магістралі) визначається за допомогою формули:

$$t_{дуги} = \frac{L_{дуги}}{V_{ГОЛ}}, \quad (1.13)$$

де $L_{дуги}$ - довжина дуги при зміні смуги руху, м. Можна визначити за допомогою формули:

$$L_{дуги} = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180^\circ}, \quad (1.14)$$

де R - радіус здійснення повороту (радіус горизонтальної кривої), м;

α - кут здійснення повороту, $^\circ$

В залежності від складу руху визначаємо інтенсивність на головній дорозі по крайній смузі руху:

Якщо інтенсивність на другорядній дорозі буде більшою, ніж інтервалів на головній дорозі ($N_{оч}$ на головній дорозі), транспортний потік на другорядній дорозі не встигне виконати маневр вливання (тобто виникатимуть затримки на перехідно-швидкісній смузі). В такому випадку необхідно буде влаштовувати додаткову смугу руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Білятинський О.А., Заворицький В.Й., Старовойда В.П., Хом'як Я.В. Проектування автомобільних доріг. Ч. I та II – К. : Вища школа, 1997. – 518 с. та 472 с.
2. Гофман В.А., Визгалов В.М., Поляков М.П. Пересечения и примыкания автомобильных дорог. – М. : Высшая школа, 1989. – 319 с.
3. Проектування і будівництво автомобільних доріг. Довідник / В. Й. Заворицький, В. П. Старовойда, О. А. Білятинський та ін. – К.: Техніка, 1996. – 379 с.
4. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.

ШТУЧНІ ТА ПІДЗЕМНІ ТРАНСПОРТНІ СПОРУДИ

УДК 656.627.2

Медведєва Т.В.,

Скрипник Т.В., к.т.н.

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ УДОСКОНАЛЕННЯ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗЛИВОВОЇ КАНАЛІЗАЦІЇ М. ГОРЛІВКА

Анотація. У статті наведено розробку програми удосконалення капітального ремонту та експлуатації зливової каналізації.

Ключові слова: капітальний ремонт, каналізація, стічні води.

Аннотация. В статье приведены разработку программы усовершенствования капитального ремонта и эксплуатации ливневой канализации.

Ключевые слова: капитальный ремонт, канализация, сточные воды.

Abstract. The article presents the development of program improvement repair and maintenance of storm water drain.

Keywords: repair, drainage, sewage.

Важливим елементом збільшення терміну служби дорожнього полотна, безпеки дорожнього руху є наявність на вулицях та дорогах зливової каналізації. За оцінками фахівців близько 30 км мереж зливової каналізації м.Горлівки є безхозними.

Існуючі проблеми відсутності фінансування робіт з експлуатації мереж, капітального ремонту та розвитку системи зливової каналізації міста не дозволяли підтримувати їх у задовільному стані та здійснювати будівництво нових мереж.

Для вирішення більшої частини існуючих проблем необхідно розробити програму удосконалення капітального ремонту та експлуатації зливової

каналізації м.Горлівка. Заходи Програми будуть спрямовані на поліпшення комфортного проживання населення, збільшення служби дорожнього покриття, підвищення безпеки руху транспорту. Впровадження передових матеріалів та технологій значно знизять витрати на експлуатацію, підвищать надійність і якість роботи мережі зливової каналізації.

Діюча схема зливової каналізації пропонує частково направляти дощові стічні води на міські очисні споруди, де вони будуть, розбавляючи з фекальними водами, проходить повну біологічну очистку [3]. Розрахунки показують, що запропонована схема дозволить очистити зливі стоки від центральної частини міста на міських очисних спорудах після їх модернізації. Це може здійснитися при проведенні капітального ремонту автодоріг і дорожніх споруд. Капітальний ремонт виконується відповідно до розробленої проектно-кошторисної документації, що пройшла державну експертизу та затверджена в установленому порядку. Капітальний ремонт повинен проводитися комплексно по всіх спорудах і елементах вулиці на всьому протязі ділянки ремонту вулиці [1]. Основне завдання капітального ремонту полягає в повному відновленні зношених конструктивних елементів і деталей облаштування вулиці, а також підвищення її транспортно-експлуатаційних якостей до нормативного рівня. Критерієм для призначення капітального ремонту є визначений за результатами технічного обстеження транспортно-експлуатаційний стан вулиці, при якому міцність дорожнього одягу знизилася до гранично допустимого значення або параметри та характеристики інших елементів автодороги і дорожніх споруд не задовольняють збільшеним вимогам руху настільки, що неможливо або економічно недоцільно приводити їх у відповідність до зазначених вимог за допомогою робіт з утримання [2]. Допускається проведення вибіркового капітального ремонту окремих ділянок і елементів вулиці, а також дорожніх споруд.

При проведенні капітального ремонту велика увага приділяється зливової каналізації. Злизова каналізація складається з водозбірних каналів, жолобів, пісковловлювачів, призначених для фільтрації стічної води від різноманітних забруднень [3]. Дощова вода потрапляє в водозбірний канал, після чого відводиться по трубопроводах у збірний колодезь. Водозбірні канали зверху закриваються декоративними решітками, що затримують сміття, листя.

Для локального водовідведення використовуються точкові водовідведення або дощоприймачі [4].

Чавунний дощоприймач - один з найпоширеніших елементів зливого водовідведення, що використовуються на вулицях, пішохідних переходах і автомобільних дорогах. Дощоприймач чавунний тип ДБ встановлюється на колодязі для прийому стічних вод. Рисунок 1.1. До колодязю даний дощоприймач кріпиться за допомогою чавунної рамки, яка може покриватися асфальтом або цементним розчином.



Рисунок 1.1 - Дощоприймач чавунний прямокутний тип ДБ

Основна сфера застосування круглого дощоприймача - колодязі мереж зливової каналізації автомобільних доріг. Дощоприймач чавунний тип ДК витримує навантаження до класу В, у тому числі в умовах постійного тиску, коливань температури і високої вологості. Дощоприймач чавунний тип ДК встановлюється аналогічно прямокутному дощоприймачі - за допомогою спеціального кріплення. Рисунок 1.2. Рама дощоприймача покривається асфальтом або цементним розчином.



Рисунок 1.2 - Дощоприймач чавунний круглий тип ДК

Дощоприймач з обрамленням випускається в двох видах: великий дощоприймач та малий. Рисунок 1.3. Рисунок 1.4. Дощоприймач з обрамленням використовується для організації точкового дренажу і локального збору дощових, талих і паводкових вод з ділянки. Клас навантаження - С, що дозволяє використовувати решітки водоприймальні з обрамленням на пішохідних зонах, узбіччях доріг і підприємствах автосервісу.



Рисунок 1.3 - Дощоприймач-обрамлення великий

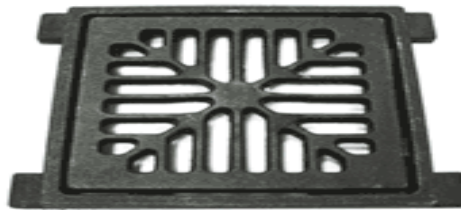


Рисунок 1.4 - Дощоприймач-обрамлення малий

Для забезпечення поверхневого водовідведення, необхідно щоб талі й дощові води по заданому похилу збиралися в канали або жолоби для збору та водовідведення поверхневих вод. Рисунок 1.5.



Рисунок 1.5 - Канали або жолоба для збору та водовідведення
поверхневих вод

Бетонні жолоба серії призначені для організації систем водовідведення. Бетонні жолоба виготовлені з армованого скловолокном бетону, методом вібропресування (бетонна суміш пресується під високим тиском, утворюючи дуже міцний матеріал). Рисунок 1.6. Завдяки використанню армуючого волокна, жолоб здобуває додаткову міцність. Для спрощення встановлення каналів, була розроблена система кріплення «шпилька в паз». Для посилення країв жолобу, можна додатково використовувати сталевий кант. У дощові сезони засмічення зливової каналізації може відбуватися по кілька разів, якщо не стежити за чистотою водовідвідних жолобів. Особливо страждає зливово

каналізація в тих випадках, коли на жолобах не встановлені захисні решітки, що затримують до 70



Рисунок 1.6 - Жолоб бетонний для збору та водовідведення поверхневих вод відсотків вуличного сміття.

Перед тим, як вода попрямує в зливову каналізацію, вона очищається від бруду і сміття в пісковловлювачах. Пісковловлювач зазвичай встановлюють на кінці лінії водовідведення та стикують його з останнім жолобом. Рисунок 1.7.

Пісковловлювач може збирати будь-яку кількість бруду, проте у разі незахищених жолобів очищення пісковловлювача доведеться робити кілька разів на сезон.



Рисунок 1.7 - Пластиковий пісковловлювач для запобігання засмічення зливової каналізації

При виконанні проекту капітального ремонту зливової каналізації, розраховується діаметр труб, в залежності від максимально можливої кількості опадів і талих вод, вибирається матеріал труб і інші складові елементи системи зливової каналізації. Жолоби, для прийому води, можуть бути встановлені бетонними, полімербетонні, пластиковими. Вибір каналу або решітки системи зливого водовідведення залежить від умов експлуатації автомобільної дороги. У місцях рідкісного руху транспорту, зазвичай встановлюють чавунні решітки для зливної каналізації, з найменшим класом навантаження на них. Рисунок 1.8. Якщо автодорога розрахована на легковий та вантажний автотранспорт, канали та решітки зливової каналізації вибирають з найбільшим класом навантаження. Рисунок 1.8.

Захисні решітки виконують дві функції: захищають канал від потрапляння листя та сміття великого і забезпечують безперешкодний проїзд транспорту по території, обладнаної системою поверхневого водовідведення. Для пластикових каналів виготовляються решітки із пластику високої щільності, сталі і чавуну. У випадку невеликих навантажень на вісь пластикового каналу оптимальним буде використання сталевих штампованих решіток, які легко витримують до півтори тонни. Рисунок 1.8.

Сталеві зварні решітки витримують навантаження до 2,5 тонн, що робить їх незамінними для організації водовідведення в паркінгу або підземній автостоянці. Суцільнолиті чавунні решітки витримують до 25 тонн - їх доречно використовувати на автозаправних станціях та інших територіях з великим навантаженням на пластиковий канал.

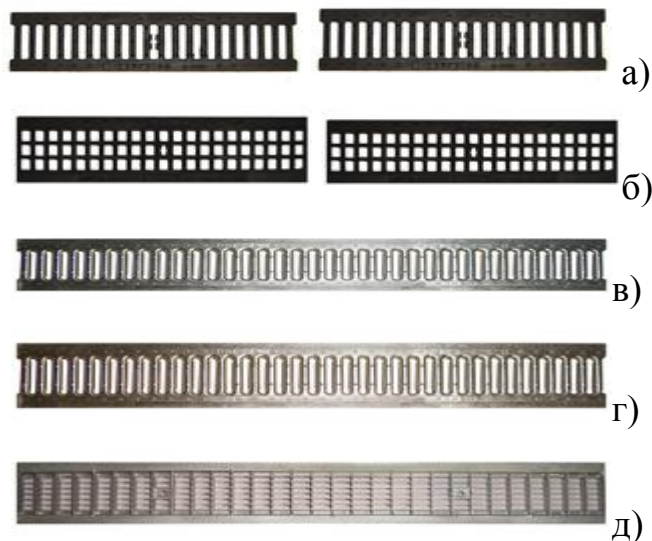


Рисунок 1.8 - Сталеві зварні решітки для запобігання засмічення зливної каналізації:

- а - решітка щілинна чавунна
- б – решітка пориста чавунна
- в - решітка сталева штампована з оцинкованої сталі
- г – решітка сталева штампована з нержавіючої сталі
- д - решітка сталева зварна

Стічні води і фекалії проходять механічне очищення в промисловому пісковловлювачі. Рисунок 1.9. Промисловий пісковловлювач - споруда для механічного очищення стічних вод, служить для виділення дрібних важких мінеральних часток (пісок, шлак, скла тощо) шляхом осадження. Рисунок 1.10.

Пісковловлювач готує стічну рідину до подальшої очищення. Сучасні технології очистки стічних вод вимагають застосування пісковловлювача з ефективністю видалення піску до 90% [5]. Вибір типу пісковловлювача продиктований, насамперед, їх особливостями стосовно до обраної технології очищення стічних вод.

Розрахунок дозволяє домогтися збільшення знімання піску вдвічі і підвищення складу піску в піскопульпі. Важливим ефектом подібної реконструкції є значне зменшення вмісту в піску органічних забруднень і після зимової посипання доріг піску-соляною сумішшю [5].



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд промислового пісковловлювача

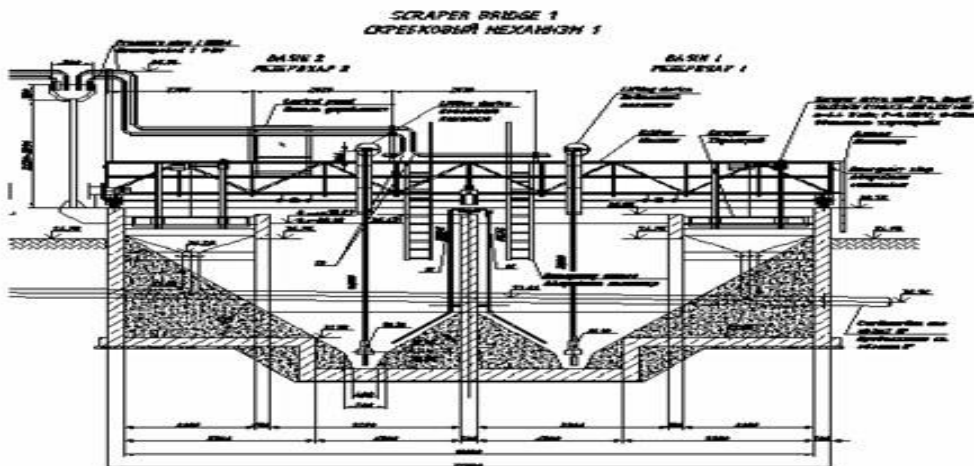


Рисунок 1.10 – Схема промислового пісковловлювача

Крім постійного очищення зливових вод необхідно проводити огляд та періодичне очищення колодязів зливової каналізації. Рисунок 1.11.



Рисунок 1.11 – Прочистка колодязя зливової каналізації

При обслуговуванні колодязь очищають під лопату. Бруд і сміття завантажують на навантажувач і вивозять на звалище. Потім колодязь промивають під тиском води, яка йде в труби центральної системи. Основною перешкодою є замуленість в трубах дощоприймачів, які засмічують після зимової посипання доріг піску-соляною сумішшю.

Для збільшення терміну служби дорожнього покриття, зміцнення матеріально технічної бази, своєчасний ремонт і розвиток мережі зливової каналізації міста Горлівка запропонована програма на 2010-2012 р «Розвиток системи зливової каналізації міста Горлівка»

Основними завданнями програми є:

1. Приведення застарілих мереж зливової каналізації в нормативний стан.
2. Прийом у комунальну власність безхозних мереж зливової каналізації.
3. Реконструкція і капітальний ремонт існуючих мереж зливової каналізації.
4. Застосування прогресивних технологій, що забезпечують належну якість робіт з ремонту та утримання об'єктів зливової каналізації і зниження їх вартості.
5. Подальше вдосконалення обліку (паспортизація, інвентаризація) об'єктів зливової каналізації, створення єдиного банку даних за технічним станом об'єктів зливової каналізації.
6. Зміцнення матеріально - технічної бази міста Горлівка з ремонту зливової каналізації.

7. Проведення капітального ремонту окремих ділянок зливової каналізації з прив'язкою по роках: в 2010р.- 1.7км; в 2011р.- 2.16км; в 2012р.- 2.51км; разом - 6.37 км.

Терміни реалізації програми: 2010-2012 роки

Джерела фінансування :

1. Кошти бюджету міста в межах коштів, передбачених на капітальний ремонт зливової каналізації.
2. Кошти обласного бюджету для утримання та ремонту автодоріг міста.
3. Інші джерела, не заборонені чинним законодавством.

Очікувані кінцеві результати реалізації програми та показники соціально-економічної ефективності: у результаті реалізації програми покращиться екологічна обстановка на території міста, збільшиться термін служби дорожнього покриття. Буде проведено інвентаризацію мереж зливової каналізації з складанням паспорта об'єкта, розроблено схему розвитку мережі зливової каналізації, нормативно-методична база для забезпечення функціонування і розвитку мережі зливової каналізації, забезпеченість доріг з твердим покриттям доведена з 30% до 45,4%.

Механізм реалізації програми:

Контроль виконання Програми та загальну координацію робіт здійснює адміністрація міста, як суб'єкт бюджетного планування.

Управління Програмою здійснює Управління комунального господарства і адміністрації міста - головний розпорядник бюджетних коштів.

Реалізація заходів Програми здійснюється відповідно до Закону України «Про місцеве самоврядування».

ЛІТЕРАТУРА

1. *«Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг»*. ВСН 24-88, Мінавтодор, РРФСР, 1989 р.
2. *Довідник інженера-дорожника «Ремонт і утримання автомобільних доріг»*, А.П. Васильєв, 1984 р.
3. *Довідник «Санітарна очистка та прибирання населених місць»*, АКХ, Москва, 1997 р.
4. *Довідник «Експлуатація та умов забезпечення безпеки дорожнього руху»* Н.П. Омельченко, 1986 р.
5. *«Нормативи чисельності робітників, зайнятих на роботах з експлуатації мереж, очисних споруд і насосних станцій»*, Москва, 1986 р.

Бородай Д.І.

ДО ОЦІНКИ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ.

Анотація. Робота присвячена проблемі довговічності залізобетонних елементів мостів. Пропонується модель оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів на стадії проектування. Модель дозволяє прогнозувати ресурс у функції часу залежно від фізико-механічних властивостей бетону й арматури, типу конструкцій, умов експлуатації. Наводяться чисельні приклади визначення довговічності залізобетонних елементів.

Ключові слова: залізобетонні елементи мостів; карбонізація; хлоридна корозія; піттингова корозія арматури; довговічність.

Аннотация. Работа посвящена проблеме долговечности железобетонных элементов мостов. Предлагается модель оценки ресурса элементов мостов на стадии проектирования. Модель позволяет прогнозировать ресурс в зависимости от физико-механических свойств бетона и арматуры, типа конструкций, условий эксплуатации. Приводятся численные примеры определения долговечности железобетонных элементов.

Ключевые слова: железобетонные элементы мостов; карбонизация; хлоридная коррозия; питтинговая коррозия арматуры; долговечность.

Abstract. This paper is devoted to the problem of bridge reinforced concrete elements durability. The prediction model of the bridge reinforced concrete elements resource on a design stage is offered. It is shown, that the resource of bridge. The model allows to predict a resource depending on physic mechanical properties of concrete and reinforcement, type of designs, operation conditions elements. A numerical example of durability definition is shown.

Key words: bridge reinforced concrete elements; carbonation; chloride corrosion; pitting reinforcement corrosion; durability.

Проблема

Согласно современным нормам проектирования железобетонных элементов их долговечность представляется как способность сооружения (элемента) сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания [1]. При этом долговечность конструкции оценивается через срок службы – время от начала эксплуатации до наступления предельного состояния.

Ранее нормами проектирования транспортных сооружений проектные сроки службы мостов не регламентировались вообще. В СССР из экономических соображений считалось, что проектный срок службы мостов должен быть 100 лет. В современных отечественных и зарубежных нормах регламентируется срок службы мостов и составляет для большинства типов мостов 100 и железобетонных - 80 лет [1, 2]. Однако проблема заключается в том, что научного обоснования этого срока службы нет.

Существующий подход в проектировании долговечности железобетонных конструкций заключается в соблюдении определенных расчетных и конструктивных требований (минимальный защитный слой бетона, оптимальное водоцементное отношение, расход цемента, максимальная плотность, минимальная пористость и т.д.), выполнение которых, считается, должно обеспечить декларируемый срок службы [1, 2].

В строительных нормах нет научно-обоснованного алгоритма определения долговечности согласно исходным физико-механическим характеристикам железобетона и ожидаемым параметрам воздействия нагрузки и окружающей среды. В расчетных неравенствах предельных состояний отсутствует переменная времени. Нормы позволяют определять мгновенную надежность, в момент начала эксплуатации конструкции, без учета процесса деградации материалов с течением времени.

При декларируемой проектной долговечности в 100 лет фактический средний срок службы отечественных сборных железобетонных мостов, например, составляет 30-40 лет [3]. Это свидетельствует не только о низком качестве строительства и эксплуатации мостов, но и о несовершенстве существующего алгоритма проектирования. Подтверждением может служить тот факт, что не только в Украине, но и в Европе большинство железобетонных мостов исчерпывают свой ресурс уже в возрасте 40-50 лет. Например, в работе

[4] приводятся статистические данные, показывающие, что в Нидерландах средний срок службы железобетонных мостов составляет 45 лет. Учитывая, что в Европе содержанию и эксплуатации транспортных сооружений уделяется гораздо больше внимания и средств чем в Украине, можно предположить, что малые фактические сроки службы мостов, по сравнению с проектными, закладываются еще на стадии проектирования.

Изложенное обосновывает тот интерес, который проявляется к проблеме у исследователей всего мира и появление работ, глобальной целью которых является разработка моделей позволяющих прогнозировать ресурс железобетонных элементов в зависимости от физико-механических свойств бетона и арматуры, напряженно-деформированного состояния, типа конструкций и условий эксплуатации. Один из возможных подходов построения модели прогноза, применимой *на стадии проектирования*, излагается ниже.

Формулировка задачи исследования

Предлагаемая здесь модель оценки ресурса железобетонных элементов мостов на стадии проектирования основывается на научной гипотезе ученого Шведского исследовательского института цемента и бетона К. Tuutti в [5]. В этой работе автор рассматривает жизненный цикл железобетонного элемента, как сумму двух этапов деградации арматуры в среде бетона: периодов инициации и развития коррозии арматуры (рис.1):

$$T = t_{in} + t_{prop}, \quad (1)$$

где T – долговечность элемента; t_{in} - время инициации коррозии; t_{prop} - время развития коррозии:

Период инициации коррозии – t_{in} это срок, в течение которого защитный слой бетона выполняет пассивирующие функции по отношению к арматуре. Этот период сопровождается проникновением и накоплением хлоридов в бетоне, а также диффузией углекислого газа в бетон, обуславливающей его карбонизацию и уменьшение показателя pH поровой влаги. Конец периода инициации связан с достижением фронта карбонизации поверхности арматуры или накоплением у поверхности арматуры некоторого критического содержания хлоридов, вызывающих начало коррозии арматуры.

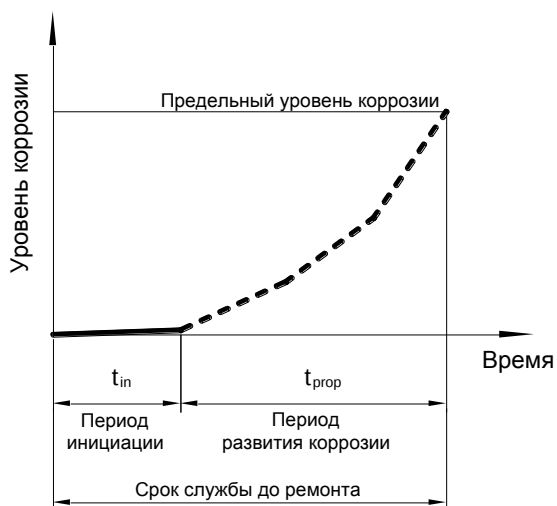


Рисунок 1. Жизненный цикл железобетонного элемента [5].

Окончание периода инициации коррозии соответствует меньшему значению продолжительности одного из двух процессов: карбонизации защитного слоя (в этом случае имеет место общая коррозия арматуры) или накопления у поверхности арматуры критической концентрации хлоридов (питтинговая коррозия);

Период развития коррозии t_{prop} — это срок от начала депассивации защитного слоя арматуры до наступления предель-

ного состояния, выбор которого зависит от типа конструкции и условий ее эксплуатации. В этот период происходит интенсивное корродирование арматуры с накоплением продуктов коррозии (ржавчины) и отслаивания защитного слоя, вследствие изменения температурно-влажностного режима, воздействия кислорода воздуха и агрессивных веществ. Период развития коррозии, в свою очередь, имеет три характерных этапа, три характерных точки: начало трещинообразования, отслаивание защитного слоя, достижение предельного состояния (рис.1).

Представленная научная идея дает гипотетическое качественное описание процесса деградации железобетонного элемента в течение жизненного цикла. Для математической реализации идеи понадобятся: модель периода инициации, модель периода развития коррозии и критерий достижения предельного состояния. Указанные модели в функции времени и критерий предельного состояния и представляют собой задачу исследования.

Модель

Предлагаемая модель прогноза долговечности железобетонных элементов мостов, в соответствии с гипотезой (1), содержит две составляющие: время инициации коррозии и время развития коррозии.

Время инициализации коррозии - это время протекания процессов карбонизации и/или насыщения хлоридами защитного слоя бетона. Модели, определяющие время деградации защитного слоя бетона, основываются на классических уравнениях аналитической теории диффузии - уравнениях

первого и второго законов Фика, сформулированных немецким ученым Адольфом Фиком в 1855 году.

1-й закон Фика устанавливает пропорциональность диффузионного потока частиц градиенту их концентрации и записывается в виде:

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2)$$

где j – плотность диффузионного потока, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; D – коэффициент диффузии вещества, $\text{м}^2/\text{с}$; $C = C(x, t)$ – концентрация диффундирующего вещества на поверхности элемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; x – координата, вдоль которой происходит процесс диффузии, м.

2-й закон Фика описывает изменение во времени концентрации диффузанта:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где t – время, с.

Процессы карбонизации и насыщения хлоридами широко исследуются в мире (например [6 -10]). Для предлагаемой модели мы воспользуемся готовыми решениями уравнений (2) и (3).

Модель карбонизация защитного слоя

Мы используем зависимость связывающую глубину карбонизации X_c с временем t полученную из первого закона Фика [6]:

$$X_c = \sqrt{2 \cdot D \cdot a^{-1} \cdot (c_1 - c_2) \cdot t}, \quad (4)$$

где D – коэффициент диффузии CO_2 в бетоне, $\text{м}^2/\text{с}$; a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации (зависит от состава бетона), $\text{г}/\text{см}^3$; c_1 – содержание диоксида углерода в воздухе на внешней поверхности бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_2 – содержание диоксида углерода на границе карбонизации, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величина a в (4) определяется по формуле:

$$a = 0,75 \cdot C_{\text{CaO}} \cdot c \cdot \text{DH} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}}, \quad (5)$$

где CCaO – содержание CaO в цементе по массе, %; c – расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; DH – степень гидратации цемента; M_{CO_2} , M_{CaO} – соответственно молярные массы CO_2 и CaO , $\text{кг}/\text{моль}$.

В зависимость (4) вводятся опытные коэффициенты, учитывающие влияние окружающей среды на скорость карбонизации:

$$X_c = k_w \cdot k_F \cdot \sqrt{2 \cdot D \cdot a^{-1} \cdot (c_1 - c_2) \cdot t}, \quad (6)$$

здесь k_w – коэффициент, учитывающий изменение физико-механических свойств бетона во времени; k_F – коэффициент влияния морозного разрушения на процесс карбонизации

$$k_w = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w, \quad (7)$$

где t_0 – время определения начальных физико-механических свойств бетона (обычно 28 дней), лет; t – время, лет; w – параметр, определяемый по формуле:

$$w = 0,5 \cdot \left(\frac{N_w}{365} \right)^{0,446}, \quad (8)$$

где N_w – число дней в году с осадками более 2,5 мм.

В работе [7] коэффициент влияния морозного разрушения на карбонизацию представляется зависимостью:

$$k_F = \frac{1}{(1-P)^{N_F t}}, \quad (9)$$

где N_F – число циклов «замораживание – оттаивание» в год; t – время, лет; P – вероятность повреждения бетона в цикле замораживание – оттаивание, которая связана с маркой бетона по морозостойкости F выражением:

$$P = \frac{0,1}{F}, \quad (10)$$

Модель процесса насыщения защитного слоя бетона хлоридами

Впервые математическая модель проникновения хлоридов в железобетон, основывающаяся на решении уравнения диффузии (3) при заданных начальных условиях, была предложена группой итальянских ученых во главе с М. Коллепарди в 1970г. в работе [8]. Решением уравнения (3) есть функция:

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t}} \right) \right], \quad (11)$$

где $C = C(x, t)$ – концентрация ионов хлоридов на глубине x за время t , кг/м³; C_S – концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного слоя, кг/м³; C_I – начальная концентрация хлоридов в бетоне (зависит от типа цемента и используемых добавок), кг/м³; D_{Cl} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, м²/с; t – время от начала эксплуатации, с; x – координата, нормальная к поверхности железобетонного элемента, м; $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибок Гаусса, определяемая как интеграл:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt, \quad (12)$$

Коэффициент диффузии хлоридов в бетоне изменяется во времени. Мы воспользуемся экспериментальной зависимостью [15], имеющей вид степенной функции:

$$D_{Cl} = D_{Cl0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha, \quad (13)$$

где α – показатель степени, зависящий от вида цемента, условий окружающей среды; D_{Cl0} – начальный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне в возрасте $t_0=28$ суток, $\text{м}^2/\text{с}$, который зависит от B/C и определяется по формуле :

$$D_{Cl0} = 10(-12,06 + 2,4 B/C), \quad (14)$$

Накопление в бетоне у поверхности арматуры определенной критической концентрации хлоридов C_{crit} ведет к нарушению пассивности стали и образованию точечных анодных язв, которые характеризуются высокой скоростью деградации стали по сравнению с общей коррозией вследствие карбонизации и которые особо опасны для высокопрочной преднапряженной арматуры. Решение (11) можно трактовать как выражение значения критической концентрации хлоридов:

$$C_{crit} = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d_{cover}}{2 \sqrt{D_{Cl0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \cdot t}} \right) \right], \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно переменной времени t , можно определить срок, соответствующий началу питтинговой коррозии.

Здесь следует заметить, что литературные данные касательно критической концентрации хлоридов C_{crit} значительно отличаются у разных авторов. Обычно это значение находится в пределах 0,2-2% от массы цемента, что объясняется влиянием большого количества факторов (B/C , тип цемента, рН поровой влаги, способа попадания хлоридов в бетон, месторасположения железобетонного элемента) на момент начала питтинговой коррозии. В последних работах, посвященных хлоридной коррозии железобетонных элементов, большинство авторов принимает $C_{crit} = 0,4\%$ для некарбонизированного бетона и $C_{crit} = 0,2\%$ для карбонизированного [7]. Близкие к этим данным приводятся также в работе [8].

Определение периода инициации коррозии t_{in}

Из уравнений (6) и (15), решая каждое из них относительно переменной времени, определяется период инициации общей коррозии арматуры t_{carb} и местной питтинговой коррозии t_{cl} соответственно. Далее, сравнивая полученные значения, определяется характер первоначальной коррозии.

Если $t_{carb} < t_{cl}$, - в этом случае имеет место общая коррозия и следует переопределить время начала питтинговой коррозии для критического значения содержания хлоридов $C_{crit}=0,2\%$. В том случае, когда переопределенное значение $t_{cl} < t_{carb}$, принимается $t_{cl} = t_{carb}$ (имеют место два вида коррозии одновременно).

Определение периода развития коррозии t_{prop}

В процессе коррозии стали в железобетоне, происходит уменьшение диаметра (площади поперечного сечения) арматуры и, одновременно, снижение ее механических характеристик (предела прочности при растяжении). Ниже представлена попытка установить зависимость снижения площади сечения арматуры и ее механических свойств от времени при коррозии, что позволит прогнозировать время наступления предельного состояния.

Для оценки глубины коррозионного повреждения арматуры в железобетоне x_{corr} воспользуемся соотношением работы [9,10]:

$$x_{corr} = V_{corr} \cdot \alpha_{pit} \cdot t, \quad (16)$$

где V_{corr} – скорость коррозии арматуры, мм/год; α_{pit} – питтинговый фактор, который учитывает характер коррозии и согласно равняется $\alpha_{pit} = 2$ при общей коррозии вследствие карбонизации и $\alpha_{pit} = 9,28$ при питтинговой коррозии; t – время, лет.

На скорость коррозии V_{corr} влияют следующие факторы:

- омическое сопротивление бетона защитного слоя;
- гальванические эффекты;
- содержание хлоридов в бетоне;
- температурно-влажностный режим.

В зависимости от условий воздействия окружающей среды скорость коррозии определяется по формуле:

$$V_{corr} = V_{corr,a} \cdot \frac{N_w}{365}, \quad (17)$$

где $V_{corr,a}$ – средняя скорость коррозии арматуры, мм/год, которая определяется исходя из природных условий эксплуатации железобетонного элемента по таблице 1; N_w – число дней в году с осадками более 2,5 мм.

Таблица 1. Средняя скорость коррозии стальной арматуры в железобетоне $V_{corr,a}$ в различных условиях эксплуатации [10]

Коррозионное состояние	Условия эксплуатации	$V_{corr,a}$, мм/год
Общая коррозия при карбонизации	на открытом воздухе	0,005
	в помещении	0,002
Питтинговая коррозия	сухие	0,004
	переменная влажность	0,03
	в воздухе над морской водой	0,03
	зона периодического смачивания	0,07

Таким образом, установив значение предельного коррозионного повреждения арматуры x_{corr} , из уравнения (16), можно определить продолжительность периода развития коррозии t_{prop} .

В предлагаемой модели деградации оценка срока службы железобетонных элементов мостов выполняется по второй группе предельных состояний. Моделью устанавливается связь величины x_{corr} с предельной допустимой шириной раскрытия трещин Δ_{cr} . Для случая образования трещин шириной раскрытия до 1мм воспользуемся зависимостью [11]:

$$a_{cr} = 0,05 + 0,0125(x_{corr} - x_{corr,0}), \quad (18)$$

где a_{cr} – ширина раскрытия трещины, мм; x_{corr} – глубина коррозионного повреждения арматуры, мм; $x_{corr,0}$ – глубина коррозионного повреждения арматуры, соответствующая началу образования трещин, мм, определяемая эмпирической формулой:

$$x_{corr,0} = 83 + 7,4 \cdot \frac{d_{cover}}{D} - 22,6 \cdot R_{b,sh}, \quad (19)$$

где d_{cover} – толщина защитного слоя бетона, мм; D – диаметр арматуры, мм; $R_{b,sh}$ – прочность бетона на скалывание при изгибе, МПа.

В использовании модели может представится два случая:

- если появление трещин не допустимо, то определяется $x_{corr,0}$ глубина коррозионного повреждения арматуры, соответствующая началу образования трещин, для которого определяется время развития коррозии зависимостью (16);

- если допустимо появление трещин определенной ширины a_{cr} , то из уравнения (18) определяется величина x_{corr} , подставляется в уравнение (16) и решается относительно переменной времени для нахождения величины t_{prop} .

Оценка долговечности T железобетонного элемента моста

Долговечность железобетонного элемента моста, в соответствии с основной гипотезой исследования (1), определяется, как сумма продолжительности периода инициации t_{in} (6) и периода развития коррозии t_{prop} (11) или (16), в зависимости от установленного предельного коррозионного повреждения арматуры в бетоне.

Анализ модели

Приведенная детерминистическая модель прогнозированию долговечности железобетонных элементов мостов анализировалась путем постановки численных экспериментов. Получены значения времени карбонизации бетона защитного слоя и времени накопления критической концентрации хлоридов у поверхности арматуры в зависимости от коэффициентов диффузии агрессивных веществ. Данные расчетов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 Время карбонизации защитного слоя бетона t_{carb}

Толщина защитного слоя, мм	Время карбонизации защитного слоя бетона t_{carb} при значениях коэффициента диффузии CO_2 в бетоне D , cm^2/c		
	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
25	5	54	140
50	27	104	199
75	50	136	235

Таблица 3 Время накопления критической концентрации хлоридов t_{cl}

Толщина защитного слоя, мм	Время начала питтинговой коррозии t_{cl} при значениях коэффициента диффузии хлоридов в бетоне D_{ClO} , cm^2/c		
	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$
25	1	8	46
50	4	22	132
75	7	42	247

Как видно из таблиц 2 и 3, для конструкций на открытом воздухе, накопление критической концентрации хлоридов происходит гораздо раньше карбонизации бетона. Это можно объяснить решающим влиянием влажности, которая значительно тормозит продвижение фронта карбонизации. Поэтому для мостов, как конструкций на открытом воздухе, характерно преобладание питтинговой коррозии.

В таблице 4 приводится время раскрытия трещин в железобетонных элементах, подверженных хлоридной коррозии, определенное из зависимостей (16 - 19).

Таблица 4 Время раскрытия трещины заданной ширины в зависимости от отношения толщины защитного слоя бетона к диаметру арматуры

Отношение толщины защитного слоя бетона к диаметру арматуры	Время раскрытия трещин t_{prop} шириной a_{cr} , мм		
	0	0,15	0,3
1,5	7	28	59
2	8	29	61
2,5	9	30	62

Таблицы 2-3 дают достаточно реалистичные значения факторов модели и позволяют оценить в первом приближении ресурс железобетонных элементов мостов при заданных начальных условиях.

Выводы и открытые вопросы

1. Представленная здесь модель прогноза долговечности железобетонных элементов мостов на стадии проектирования позволяет прогнозировать срок службы железобетонных элементов в зависимости от физико-механических свойств бетона и арматуры, типа конструкций, условий эксплуатации.

2. В соответствии с центральной гипотезой модели, долговечность железобетонного элемента представляется, как сумма двух периодов различного коррозионного состояния стали в бетоне: пассивного (период инициации) и активного (период развития коррозии). Период инициации отождествляется с процессом карбонизации бетона защитного слоя или с процессом накопления критической для развития коррозии концентрации хлоридов у поверхности арматуры. Период развития коррозии – время интенсивного коррозионного разрушения арматуры до определенного предельного значения.

3. Критическая концентрация хлоридов, как было отмечено выше, зависит от многих факторов и, например, для разных железобетонных элементов одного моста может значительно отличаться. Поэтому в дальнейшем необходимо разработать алгоритм назначения критической концентрации хлоридов в зависимости от физико-механических характеристик бетона, внешних условий окружающей среды, условий строительства и эксплуатации железобетонных элементов мостов на основе уже имеющихся опытных данных.

4. Представленная модель прогноза долговечности железобетонных элементов мостов имеет детерминистический характер. Дальнейшее ее совершенствование должно выполняться с учетом стохастической природы процесса деградации железобетона.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д-ру техн. наук, профессору А.И. Лантух-Лященко, под руководством которого была выполнена эта работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ДБН В.2.3-22:2009*. Мости та труби. Основні вимоги проектування. К.: Мінрегонбуд. 2009.- 75с.
2. *EUROPEAN PRESTANDARD ENV 1991-1-1*. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design.-European Committee for Standardization. Brussels.- 85 p.
3. *Лантух-Лященко А.И.* Проблема довговічності залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів. Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 73 . Національний транспортний університет. К.: 2006, с. 204 -110
4. *H.E. Klatter, J.M. van Noortwijk and N. Vrisou van Eck*, «Bridge management in the Netherlands: prioritisation based on network performance ». First international Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - IABMAS 2002, Barcelona, 14-17 July, 2002.
5. *K. Tuutti*, « Corrosion of Steel in Concrete », Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stockholm (1982).
6. *Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П.* Долговечность железобетона в агрессивных средах.- М.: Стройиздат, 1990.- 320с.
7. *Васильев А.И.* Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов. Труды ЦНИИС. Вып. 208.Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов. Под ред. канд. техн. наук А.И.Васильева. М., 2002, С. 101-120.
8. *LIFECON; Models for the Prediction of the Residual Service Life*. State of the Art.- Report. Deliverable D3.2, Project G1RD-CT-2000-00378, 2003.
9. *DuraCrete: Brite EuRam III Project BE95-1347*, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998.
10. *DuraCrete: Brite EuRam III Project BE95-1347*, Report R9, Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions, 2000.
11. *Rodriguez, J., Ortega, L. M., Casal, J., and Diez, J. M.* «Corrosion of Reinforcement and Service Life of Concrete Structures» 7th International Conference on Durability of Building Materials and Components. 1996, Stockholm

Корецький А.С. к.т.н., Руденок Л.О.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД.

Анотація. Розглянута можливість використання генетичного алгоритму для вирішення багатопараметричних задач в проектуванні конструкцій. Наведено загальну схему розрахунку з використанням генетичного алгоритму.

Ключові слова: генетичний алгоритм, проектування конструкцій.

Аннотация. Рассмотрена возможность использования генетического алгоритма для решения многофакторных задач при проектировании конструкций. Приведена общая схема расчета с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: генетический алгоритм, проектирование конструкций.

Abstract. The paper discovers possibility of genetic algorithm usage for solving multivariate problems in the structural design. General design scheme presented using genetic algorithm.

Keywords: genetic algorithm, structural design.

Класичні методи проектування елементів мостових конструкцій побудовані на розрахунку допустимого рішення задачі. В час високих технологій існує можливість удосконалювати методи проектування для того щоб, отримане рішення було оптимальне і, що найголовніше, враховувало особливості реальних проектно-конструкторських задач. Досягти цього тільки за допомогою класичних математичних методів досить важко.

Конструкцію можна охарактеризувати рядом показників: вартість, надійність, вага, габарити, час розробки та інші, які часто можуть знаходитись у взаємному протиріччі. Особливістю підходу, що базується на основі генетичного алгоритму, є комплексний аналіз та розробка, що дозволить спроектувати систему в цілому, а не окремими її частинами. А основою

методології оптимального проектування складних технічних систем є системне проектування.

Процедуру проектування необхідно будувати так, щоб на кожному наступному етапі об'єм інформації про конструкцію зростав. Одночасно із цим необхідно виключати незадовільні варіанти, які виникають в ході проектування. Виділяється дві тенденції – генерація множини варіантів і відкидання незадовільних. [1]

Ідея генетичних алгоритмів належить Джону Холланду, який своєю працею «Адаптація в природних і штучних системах» (1975) заклав початок для розвитку досліджень в цьому напрямку [2].

Генетичні алгоритми – це адаптивні методи пошуку, які останнім часом використовуються для вирішення задач функціональної оптимізації. В їх основі лежать генетичні процеси біологічних організмів: біологічні популяції розвиваються на протязі декількох поколінь, підпорядковуючись законам природного відбору і принципу «виживає найбільш пристосований» (survival of the fittest), який був відкритий Чарльзом Дарвіном. [3] Наслідуючи цей процес генетичні алгоритми здатні «розвивати» рішення реальних задач, якщо ті належним чином закодовані.

Генетичні алгоритми, як еволюційні алгоритми взагалі, застосовують для пошуку глобального екстремуму функцій багатьох змінних. Принцип їх роботи заснований на моделюванні деяких механізмів популяційної генетики, маніпулюванні набором хромосом при формуванні генотипу нової біологічної особи шляхом наслідування ділянок хромосом батька, які випадковою зміною генотипу, який відомий в природі як мутація. [4]

На рис.1 зображено схему роботи генетичного алгоритму. Головна ідея еволюції в тому, щоб покращувати розвиток індивідів першої генерації популяції, поки не буде досягнуто критерію завершення.

1. Створення початкової популяції. Створюємо початкову множину варіантів, приймаємо гени варіантів в раніше встановленій області випадковими і рівномірно розподіленими, цей процес подібний методу Монте-Карло.

2. Оцінка варіантів. Кожному із новонароджених індивідів необхідно на основі цільової функції визначити функцію пристосованості (fitness function). [4, 5] Чим більше значення цієї функції, тим вище якість варіанту.

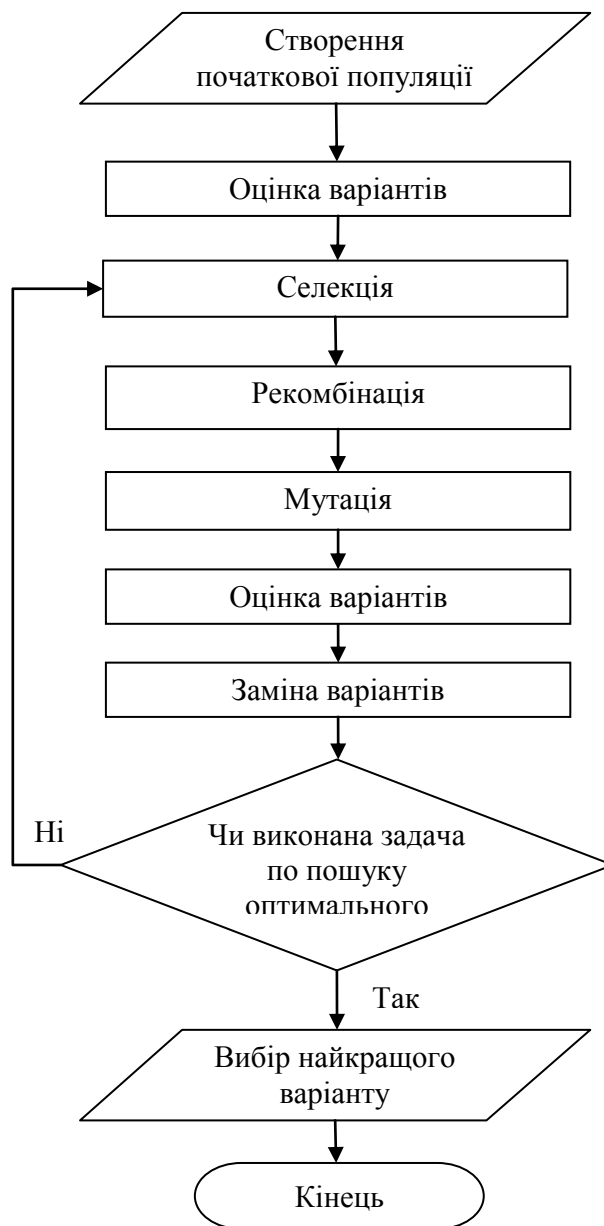


Рис. 1 Схема роботи генетичного алгоритму

3. Селекція. Реалізується у виборі по розрахованим на попередньому етапі значенням функції пристосованості тих варіантів, які будуть приймати участь в утворенні нащадків для наступної популяції, тобто для наступного покоління. Такий вибір виконується по принципу природного відбору, по якому найбільші шанси на участь в утворенні нових особин мають варіанти з найбільшими значеннями функції пристосованості.

4. Рекомбінація. На першому етапі схрещування обираються пари варіантів із батьківської популяції. Це тимчасова популяція, яка складається із варіантів,

які були відібрані в результаті селекції і призначені для подальшого перетворення операторами схрещування і мутації з ціллю формування нової популяції нащадків. На цьому етапі варіанти об'єднуються в батьківські пари. Це виконується випадковим способом у відповідності з імовірністю схрещування.

5. Мутація змінює окремі гени популяції. Завдяки цьому при генетичному алгоритмі популяція повинна оновлюватися, тому що з відтворенням генів йшла б втрата багатоманітності популяції зазвичай вже після малого числа генерацій. [6]

6. Оцінка варіантів. Після того як шляхом рекомбінації і мутації варіанти змінені, необхідно для кожного із новонароджених визначити фітнес функцію (функцію пристосованості).

7. Заміна варіантів. Наприкінці петлі генерації необхідно встановити, які варіанти із популяції виключаються. Інакше без заміни популяція росла б усе далі. Генетичний алгоритм замінює зазвичай більшість батьків новонародженими.

8. Критерій завершення. Використовують два критерії припинення:

1) контроль фітнесу, в результаті якого процес припиняється, якщо в рамках встановленого числа генерацій максимальна величина фітнесу в популяції кардинально не покращується;

2) встановлення числа генерацій.

Якщо критерії завершення задовольняються, то з популяції обирається кращий варіант – він і є оптимальним. У випадку коли критерії завершення не виконуються процес повторюється з третього етапу, а саме з селекції.

Оптимізація проектування елементів транспортної споруди конструкції на основі генетичного алгоритму дозволяє вирішувати досить складні задачі. Генетичний алгоритм – це потужний пошуковий засіб. Але рішення, які отримані на його основі можуть бути субоптимальними. Через те, що на останньому етапі під час контролю фітнесу можуть виникати ситуації, коли функція фітнесу досягнувши якоїсь величини (максимальної для цієї популяції), може залишатись незмінною деякий час, і саме через довготривалість (декілька поколінь) якого генерація зупиняється. Але ж

насправді може бути, що на наступному етапі внаслідок вдалої мутації може наступити максимальний фітнес (шуканий оптимальний варіант). Але це не заважає використанню генетичного алгоритму для пошуку глобальних екстремумів при оптимізації мостових конструкцій.

Генетичні алгоритми на відміну від відомих аналітичних методів оптимізації прийнятні для вирішення багатопараметричних невиспуклих задач. За допомогою цього методу можна шукати оптимальні варіанти за всіма можливими показниками (наприклад - вартістю, надійністю, міцністю і т.д.) одночасно.

Уточнення відповіді відбувається внаслідок збільшення щільності сітки кінцевих елементів. При збільшенні кількості параметрів, які оптимізуються зростає і число варіантів і генерацій. Це може викликати збільшення часу на розрахунок результатів. [6]

Методика оптимізації проектування елементів мостової конструкції за допомогою генетичного алгоритму може послужити основою розробки програмних комплексів, які будуть проектувати оптимальні, а не просто допустимі варіанти конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Юрьев А.Г., Клюев С.В.* Генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: Матер. Междунар. науч. конф. В 4т. – Старый Оскол: Изд-во СТИ МИСиС, 2004. – Т. 4. – С. 238–240.

2. http://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм

3. <http://algolist.manual.ru/ai/ga/ga1.php>

4. *Юрьев А.Г., Клюев С.В., Клюев А.В.* Оптимизация строительных конструкций на основе генетического алгоритма // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 1 – с.62

5. *Genetic Operators, the Fitness Landscape and the Traveling Salesman Problem*, D.Whitley and K. Mathias, *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN 2*. R. Mainner and B Manderick, eds., pp. 219-228. North Holland-Elsevier, 1992.

6. *Рутковская М., Плинский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: М., Горячая Линия – Телеком, 2006. – с. 124-136.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕНЬ ҐРУНТОВИХ ВОД ПРИ ПІДТОПЛЕННІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ

Анотація. На положення рівнів ґрунтових вод в межах території автомобільної дороги впливає інфільтрація. Мінливість величини інфільтрації в часі пов'язана з кліматичними умовами, із зміною кліматичних і біологічних чинників.

Ключові слова: рівень ґрунтових вод, гідрогеологічні умови, інфільтрація, розрахункові схеми.

Аннотация. На положение уровней грунтовых вод в границах территории автомобильной дороги влияет инфильтрация. Непостоянство инфильтрации во времени связано с климатическими условиями, с изменением климатических и биологических факторов.

Ключевые слова: уровень грунтовых вод, гидрогеологические условия, инфильтрация, расчетные схемы.

Abstract. Infiltration affects the location of ground water table within the highway area. Temporal variability of infiltration magnitude is due to climatic conditions as well as to changing climatic and biological factors.

Keywords: ground water table, hydro-geological conditions, infiltration, design diagram

Основні методи визначення положень рівнів ґрунтових або міжпластових вод засновані на математичному моделюванні задач фільтрацій шляхом інтеграції повних рівнянь по вертикалі або за допомогою усереднювання функцій і коефіцієнтів, або безпосередньо із застосуванням балансових співвідношень.

В статті достатньо стисло, але докладно викладено розрахунки фільтрацій ґрунтових вод для різних гідрогеологічних умов. Вплив водоймищ, великих каналів, значних опадів, паводків та підтоплень на умови прилеглих територій

відбувається за рахунок підпору існуючих рівнів ґрунтових вод. Типові розрахункові схеми, що використовуються для прогнозу рівнів ґрунтових вод, приведені на рис. 1.

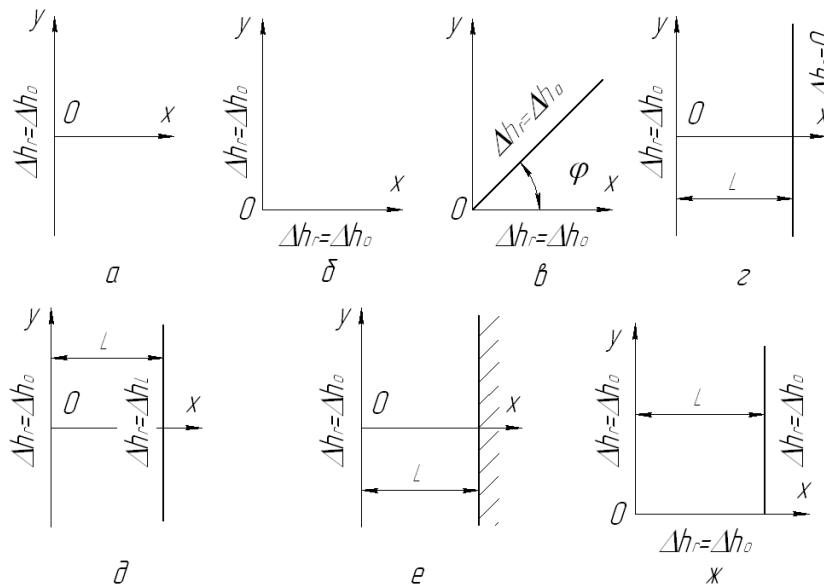


Рис. 1. Розрахункові схеми планової області фільтрації при збільшенні рівнів ґрунтових вод на межі: а - напівобмежений шар; б - квадрант шару; в - кут шару ($\varphi=\pi/4$); г, д, е - смуга шару; ж – півсмуги

Рівні води на межах потоку фільтрації в загальному випадку є мінливими в часі. На положення рівнів ґрунтових вод в межах території, що захищається, робитиме вплив також інфільтрація. Значення інфільтраційного живлення змінюється в часі.

Мінливість величини інфільтрації в часі пов'язана з кліматичними умовами, із зміною кліматичних і біологічних чинників (нерівномірністю випадання атмосферних опадів, сезонними коливаннями випаровування, транспірування і тому подібне).

Розрахункові схеми геометричної форми шару в плані приймаються такими, як на рис. 1: напівобмежений шар, кут шару, квадрант шару, смуга шару, півсмуги. Крім того, вводяться ще дві схеми: необмежений шар і прямокутник шару.

Запропоновано рішення для простих розрахункових схем з урахуванням основних типів граничних умов: першого, другого і третього роду.

У шаруватому інженерно-геологічному розрізі визначається шар з мінімальним коефіцієнтом фільтрації. З ним порівнюються коефіцієнти фільтрації кожного шару.

Якщо для шарів співвідношення коефіцієнтів фільтрації складає ≤ 10 , то водоносна товща вважається порівняно однорідною. Розрахункова схема підтоплення схилу показана на рис. 2.

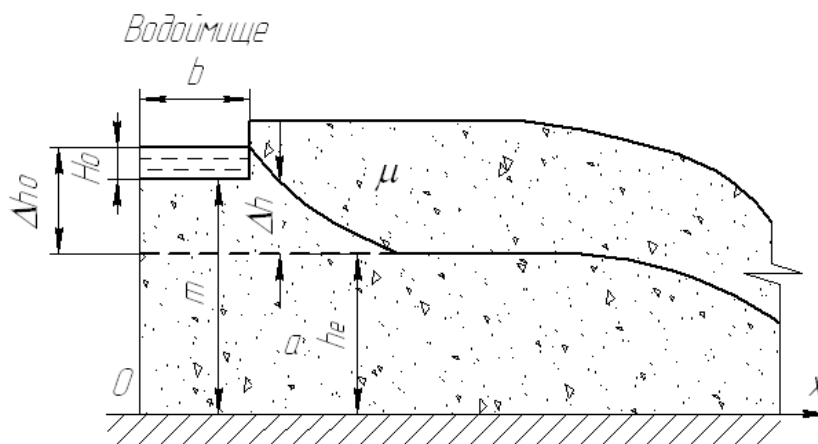


Рис. 2. Розрахункова схема підтоплення від водоймища

Для кожної товщі визначають сумарні потужності h , провідність T і середньозважані значення коефіцієнта фільтрації K_i :

$$h = \sum_{i=1}^n h_i, \quad K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad T = \sum_{i=1}^n K_i \cdot h_i. \quad (1)$$

Якщо водоймище досконале і прорізає водоносний шар або розкриває його в межах 0,5-0,7 потужності водоносної товщі, а в плані є прямою лінією з постійним граничним підпором Δh_0 , то вказана величина приймається для прогнозу і підставляється у формулу (2). Для недосконалого водоймища величина Δh_0 уточнюється по методу опорів фільтрацій, розробленому В.М. Шестаковим.

Формула М.М. Верігіна для прогнозних розрахунків підпору (підвищення) рівня ґрунтових вод має вигляд

$$\Delta h(x,t) = \Delta h_0 \operatorname{erfc}(\lambda), \quad \operatorname{erfc}(\lambda) = 1 - \operatorname{erf}(\lambda), \quad \lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (2)$$

де $\operatorname{erf}(\lambda)$ - інтеграл вірогідності; x - координата розрахункової точки, що відраховується від межі області фільтрації, м; a - коефіцієнт рівня проводимості шару, м²/добу; t - час процесу формування підпору після наповнення водоймища, доба.

Якщо на межі потоку фільтрації вздовж граничного контура $x = L$ зберігається рівень височування (наприклад, на схил, в глибоку балку і тому подібне), то розрахунок прогнозного підняття рівня ґрунтових вод $h(x, t)$ під впливом підпору від водоймища виконується по формулі

$$\Delta h(x,t) = \Delta h_0 \left[1 - \bar{x} - S(\bar{x}, \tau) \right], \quad (3)$$

де $\bar{x} = \frac{x}{L}$, $\tau = \frac{at}{L^2}$, $S(\bar{x}, \tau)$ - функція, графік якої для практичних розрахунків приведений на рис. 3; x - відстань розрахункової точки від урізання водоймища, м.

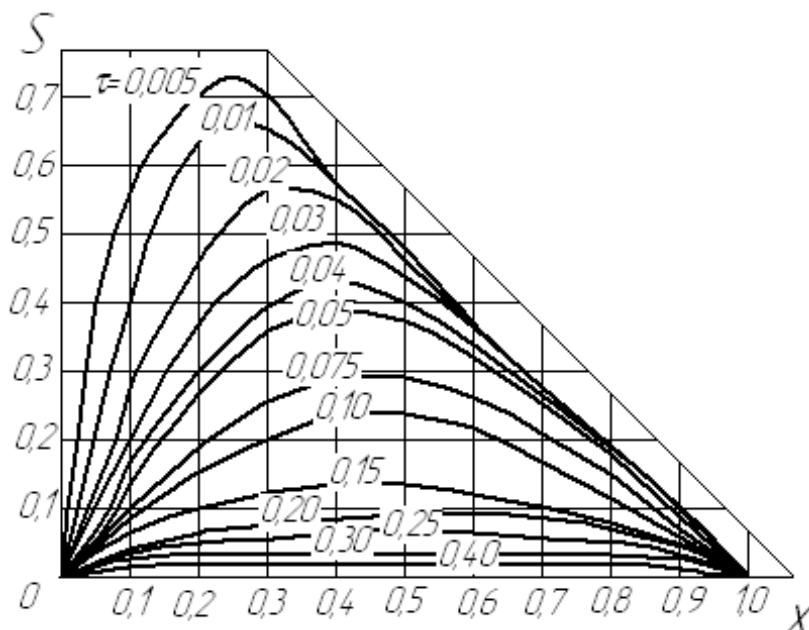


Рис. 3. Графік функції $S(\bar{x}, \tau)$

При певних умовах підняття рівнів ґрунтових вод супроводжується набуханням ґрунтів, зміною їх міцності, зсувними процесами. Прогнозне підвищення рівня ґрунтових вод Δh при $\varepsilon = \text{const}$ обчислюється за допомогою рівняння

$$\Delta h(x, y, t) = 0,25 \frac{\varepsilon t}{\mu} [I(\eta_x, m_1) - I(\eta_x, m_2) - I(\xi_x, m_3) + I(\xi_x, m_4)], \quad (4)$$

$$\text{де } \eta_x = \frac{x+b}{2\sqrt{at}}; \quad \xi_x = \frac{x-b}{2\sqrt{at}}; \quad m_{1,2} = \frac{y \pm l}{x+b}; \quad m_{3,4} = \frac{y \pm 1}{x-b}; \quad x, y - \text{координати}$$

розрахункової точки планової області, м; ε - розрахункова інтенсивність інфільтрації, м/добу; t - тривалість прогнозного періоду, доба; μ - коефіцієнт водовіддачі ґрунту в зоні аерації; b і l - геометричні параметри ділянки інфільтрації, м; a - коефіцієнт рівня провідності шару, м²/добу.

Основним критерієм визначення ступеню підтоплення території є порівняння існуючих H_i і прогнозних H_{np} положень рівнів ґрунтових вод з критичними значеннями $H_{кр}$, при яких можливо утворення на схилах зсувних явищ.

Висновок

Проектні рішення по улаштуванню дренажу повинні бути вибрані і запроектовані так, щоб можна було консервувати або покращувати ґрунти підстав споруд і схилів і не допускати розвитку несприятливих інженерно-геологічних процесів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Білеуш А.І. Інженерний захист та освоєння територій. Довідник / А.І. Білеуш, В.С. Ніщук, А.С. Штекель. – К.: Основа, 2000. – 329 с.
2. Олейник А.Я. Математическое моделирование экологических катастроф, связанных с изменением режима грунтовых вод / А.Я. Олейник, В.С. Кремез, А.А. Добронравов // Вісник Української державної академії водного господарства. – Рівне. – 1998. – С.113-118.
3. Gismo J.M. Infiltration effects on stability of a residual soil slope / J.M. Gismo, H. Rahardjo, E.C. Leong // Computers and Geotechnics. – 2000. – 26, N2. – P. 45-65.

ДОРОЖНІ УМОВИ ТА БЕЗПЕКА РУХУ

УДК 625.7/.8

Резник В.М., к.т.н., Вознюк А.Б.

Дудник Н.М., Титенко О.Г.

ДИЙОВА ПРОГРАМА ПОКРАЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА ДОРОГАХ, ВУЛИЦЯХ ТА ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕЇЗДАХ УКРАЇНИ У 2008–2012 РОКАХ

Анотація. Аналіз минулої та створення нової програми покращення безпеки дорожнього руху на дорогах, вулицях та залізничних переїздах України.

Ключові слова: ДТП, безпека дорожнього руху, водій.

Аннотация. Анализ прошлой и создание новой программы улучшения безопасности дорожного движения на дорогах, улицах и железнодорожных переездах Украины.

Ключевые слова: ДТП, безопасность дорожного движения, водитель.

Abstract. Analysis of the past and creating new programs to improve road safety on the roads, streets and crossings of Ukraine.

Keywords: accidents, traffic safety, driver.

Одночасно з пропозиціями авторів розглядаються положення аналогічної ПРОГРАМИ, розробленої Департаментом Державтоінспекції МВС України.

У першому розділі проекту ПРОГРАМИ автори проводять дуже стислий аналіз попередніх аналогічних цільових Програм з безпеки дорожнього руху 1998 року та 2003 року і приходять до висновку, який, м'яко кажучи, описали неправдиво. Замість слів: “жодна з програм не досягла заявлених цілей” слід писати: “жодна з програм не передбачалась до виконання – це були пусті аркуші паперу”. Слід відмітити, що попередні програми, як належить, пройшли

тяжкий шлях погодження з відповідними відомствами. У розпорядженні Кабінету міністрів України цим відомствам належало розроблення регіональних програм **і виконання запланованих заходів**.

Посилання на “брак коштів”, як основну причину невиконання заходів програм, говорить про низьку кваліфікацію і відсутність професіональних навичок авторів щодо **організації і здійснення контролю виконання**.

Автори ПРОГРАМИ визнають, що виконання вимог Закону України “Про дорожній рух” ніхто у повній мірі не контролював: ні Верховна Рада, ні Мінтранс України, ні Держбуд України, ні МВС України і, навіть, ні Державтоінспекція, яка взяла на себе (у Положенні) обов’язки державного органу з безпеки дорожнього руху (БДР).

Посилання на “брак коштів” на безпеку дорожнього руху не відповідає дійсному стану речей.

Можливо, автори не знали і не знають, що для здійснення наступних дійових заходів не потрібні додаткові кошти:

- вивчення Правил руху пішоходів на всіх підприємствах, установах, організаціях, а також в усіх навчальних закладах, особливо у школах і дитячих садках (вимога Закону України “Про дорожній рух”);
- постійний контроль виконання Законів України у сфері безпеки дорожнього руху, Правил дорожнього руху, ДБН, ДСТУ, ВБН, СОУ, ТУ, рекомендацій, норм та інших чинних нормативних документів (вимога Закону України “Про дорожній рух”);
- коригування згідно з основними положеннями Конвенції про дорожній рух (з урахуванням змін з 1968 року) Правил дорожнього руху (далі – Правил), створення умов, за яких порушник Правил буде нести суттєву матеріальну відповідальність;
- докорінно змінити, як такі що не відповідають вимогам часу, систему підготовки водіїв, здачі Правил, а також порядок оцінки уміння майбутнім водієм безпечно управляти дорожнім транспортним засобом (далі – ТЗ) у темну пору доби та в несприятливих погодних умовах;
- постійно інформувати населення через ЗМІ про аварійність на дорогах, вулицях, залізничних переїздах (вимога Закону України “Про дорожній

рух”), проводити експертизу (повний аналіз) обставин **виникнення** типових ДТП, показ відкритих судових процесів про ДТП(із колегією присяжних – водіїв);

- розробити нову систему підготовки співробітників Державтоінспекції усіх рівнів, викладачів, вчителів Правил дорожнього руху, вчителів-майстрів керування ТЗ, спеціалістів з організації дорожнього руху у містах, контролерів стану ТЗ.

У передмові до проекту ПРОГРАМИ не проведений аналіз ДТП за часом їх скоєння (у світлу і темну пору доби), за причинно-наслідковими факторами з урахуванням положень Законів України, Правил дорожнього руху та інших нормативних документів (далі – НД), не визначений перелік нормативних документів, які необхідно розробити

За передмовою до ПРОГРАМИ виникає відчуття, що над проблемою безпеки дорожнього руху на дорогах, вулицях та залізничних переїздах України працюють виключно спеціалісти Державтоінспекції. Відсутній аналіз результатів роботи проектно-конструкторських та науково-дослідних установ з питань безпеки дорожнього руху: НДЦ БДР, ДерждорНДІ, Національного транспортного університету, Укрдіпродору, Укрдортехнології та інших. Слід відмітити, що за останні 10 років в Україні не відбувались загальнодержавні семінари, конференції, наради з проблеми БР.

Автори проекту ПРОГРАМИ помилково пропонують доручати самим учасникам системи ВАД (водій – автомобіль – дорога) розроблення НД, змін до них: погоджені і затверджені документи не призведуть до поліпшення умов безпеки дорожнього руху – ніхто не прийме рішення, яке буде утруднювати їх подальшу діяльність.

На наш погляд, до основних пріоритетів вирішення проблеми можна віднести лише два:

1) Створення окремого державного органу з забезпечення БДР (бюро, комітету, відділення тощо).

2) Дійовий жорсткий **Контроль** виконання вимог чинних законів, правил, норм та інших нормативних документів, положень затвердженої ПРОГРАМИ.

У першу чергу слід виправити заходи, на які за останні 10 років співробітники Державтоінспекції давали погодження, що розцінювалось як дозвіл, на:

- будівництво АЗС у небезпечних місцях;
- встановлення в активній частині поля зору водіїв гігантських розмірів яскравої реклами, яка відвертає увагу водіїв від дорожньої обстановки;
- розташування кіосків, будок, палаток, інших торгових об'єктів у місцях, де вони закривають видимість;
- паркування автомобілів на тротуарі та у місцях де зупинка заборонена;
- переведення частини залізничних переїздів із шлагбаумом на переїзди без шлагбаума.

Стратегічна ціль у ПРОГРАМІ повинна бути одна: зменшення аварійності на вулицях, дорогах, залізничних переїздах, забезпечення здоров'я і життя людей – учасників дорожнього руху.

Пропозиції:

- збільшити відсоток відрахувань на безпеку дорожнього руху з вартості палива і мастила, включивши його до місцевих бюджетів (до 20 %).
- перегляд положення щодо обов'язкового страхування третіх осіб при ДТП.
- обов'язкове вивчення з подальшим здаванням іспитів з Правил руху пішоходів у всіх вищих та середніх навчальних закладах України.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Державна програма забезпечення безпеки руху на автомобільних дорогах, вулицях міст, інших населених пунктів і залізничних переїздах на 2003–2007 роки*, Кабінет Міністрів України; Розпорядження від 29.01.2003 р. № 56-р.
2. *Закон України “Про дорожній рух”* від 30.06.1993 р. № 3353-ХІІ.
3. *Конвенція о дорожном движении* (Вена, 8 ноября 1968 года) (с поправками от 3 марта 1993 года).
4. *Правила дорожнього руху*, редакція від 08.10.2008 р.

Дідківська Л.С.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КРИТЕРІЇВ СТАЦІОНАРНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

Анотація. Оцінка впровадження світлофорного регулювання через коефіцієнт завантаження дороги та його аналіз.

Ключові слова: світлофор, регулювання, інтенсивність руху.

Аннотация. Оценка внедрения светофорного регулирования через коэффициент загрузки дороги и их анализ.

Ключевые слова: светофор, регулирования, интенсивность движения.

Abstract. Evaluation of the implementation of traffic light control because the load factor and the way his analysis.

Keywords: traffic light regulation of traffic.

Сучасні умови, в яких функціонують перехрестя, дозволяють розглядати методи гнучкого регулювання (МГР) дорожнім рухом (ДР) як перспективні та актуальні. В той же час значна вартість обладнання, задіяна до реалізації таких алгоритмів, висуває задачу техніко-економічної доцільності їх впровадження. Ці питання ширше розглянуто в [1]/

Очевидним є той факт, що питання впровадження світлофорного регулювання (СФР) пов'язано з рівнем завантаження напрямків [2]. Оцінити його пропонується через коефіцієнт завантаження дороги рухом Z , що дорівнює відношенню фактичної інтенсивності до пропускної здатності напрямку. Коефіцієнт може приймати значення від 0 до 1 [3]. Крім того вводиться поняття стаціонарності транспортного потоку, що дає змогу оцінити відхилення у кількості надходження транспортних засобів до перехрестя за одиницю часу [4].

Сутність гнучких методів СФР полягає у тому, що режими світлофорного регулювання на перехрестях вулично-дорожньої мережі (ВДМ) не

характеризуються сталими у часі значеннями тактів, фаз і циклу регулювання, що звичайно задаються програмним шляхом, а автоматично змінюються у залежності від реальних умов і змін характеристик дорожньоруку руху (швидкості, інтенсивності, щільності, інтервалів тощо) в кожному циклі регулювання [5].

Для удосконалення оцінки стаціонарності інтенсивності $N(t)$ було застосовано елементи кореляційного аналізу. Зокрема, розраховано і проаналізовано значення функції кореляції на напрямках при різних рівнях завантаження. Збір статистичних даних відбувався під час дослідження на ВДМ м. Києва. З метою визначення і подальшого аналізу динаміки процесу $N(t)$ було проведено низку натурних експериментів. За класифікацією, наведеною в [6] їх можна охарактеризувати наступним чином: регулярність проведення – цільова, вид досліджуваного транспорту – автомобільний, характеристики, що визначаються – інтенсивність руху, кількість облікових пунктів – 2, місце проведення – трасовий, спосіб виконання – прямий (напівавтоматичний), обсяг досліджень – шляхом вибору з комплексу.

Зручними характеристиками динаміки випадкового процесу (до якого можна віднести і процес зміни інтенсивності руху $N(t)$) є його параметрична автокореляційна функція $R_x(t; \tau)$, надалі – функція кореляції. Вона відображає статистичну залежність значень процесу $N(t)$ в даний момент часу t від його значень в інші моменти часу $(t+\tau)$ і визначається виразом [4]:

$$R_x(t_1; t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 f(x_1; x_2; t_1; t_2) dx_1 dx_2 \quad (1)$$

Де t_1 і t_2 моменти часу, між якими визначається статистичний взаємозв'язок випадкових величин x_1 і x_2 . Для дослідження випадкових процесів, до яких відноситься і $N(t)$, застосовують формулу виду:

$$R_x(t_1; t_2) = M\{x(t_1)x(t_2)\} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N x(t_1)x(t_2) \quad (2)$$

Де N – кількість реалізацій випадкового процесу; $x(t_1)$; $x(t_2)$ – значення $x(t)$ в моменти часу t_1 і t_2 , відраховуваний від початку кожної реалізації.

Одержані дані від проведених натурних експериментів проаналізовано, а результати обчислень за формулою (2) приведені до одиниці і наведені у графічному вигляді (Рис.1) (для дослідження на одному об'єкті ВДМ) :

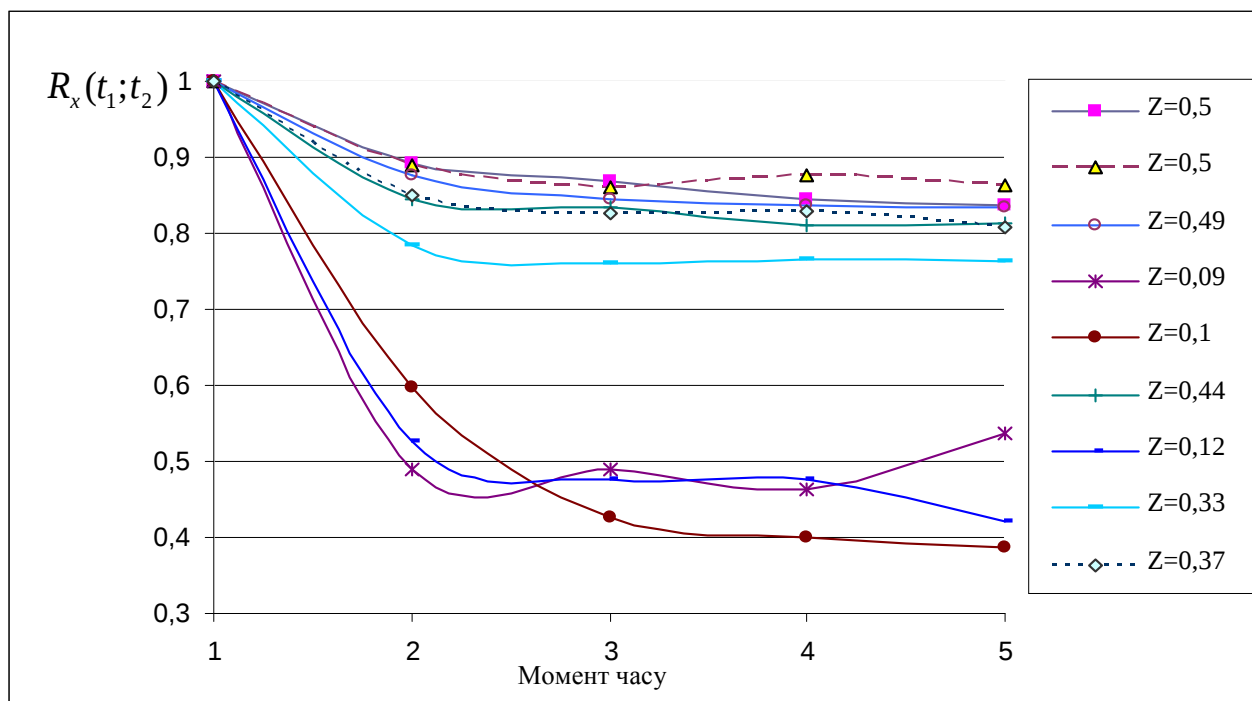


Рис.1. Графіки функцій кореляції випадкового процесу $N(t)$ для обраного об'єкту ВДМ

З графіка витікає, що зі збільшенням завантаження ВДМ (відображає значення коефіцієнту Z) сімейство кривих функції кореляції вказує на підвищення рівня стаціонарності процесу зміни інтенсивності $N(t)$. В аспекті обґрунтування доцільності впровадження гнучких методів СФР це підтверджує некоректність існуючих рекомендацій наведених в [7].

Оскільки основною задачею МГР є оптимізація режиму СФР шляхом дозавантаження ненасичених фаз циклу, доцільно проаналізувати зміни інтенсивності транспортного потоку протягом проміжків часу, близьких до тривалості фази та циклу СФР. В процесі проведення експеримента приймалися інтервали 50 секунд, що розбивалися на 5 відрізків часу з дискретністю 10 с. Розглянутий транспортний потік є вільним від впливу збурення сусідніми світлофорними та іншими об'єктами ВДМ (забезпечується значною віддаленістю, що становить – 1 км 800 м).

Поведінку випадкового процесу $N(t)$ можливо кількісно оцінити і за допомогою інших, більш простих характеристик. Задача кількісної оцінки динаміки випадкового процесу $N(t)$ може бути оцінена і більш простим способом, наприклад, за коефіцієнтом рівномірності, описаним в [8]. Установлено, що за декілька послідовних часових інтервалів рівність результатів при вимірюванні інтенсивності руху практично не спостерігається.

Інтенсивність руху протягом послідовних вибірок коливається в певних межах причому на одному з інтервалів вона приймає максимальне значення. Для врахування явища розкиду значень інтенсивності руху за внутрішньогодинні відрізки часу використовується коефіцієнт внутрішньогодинної рівномірності дорожнього руху. Він визначається як відношення фактичної годинної інтенсивності руху до максимально можливої, тобто розрахованої з припущення, що за усі послідовні вибірки інтенсивність руху однакова і дорівнює максимально зафіксованій, тобто:

$$f_s = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \dots + \Delta n_m}{m \Delta n_{\max}}, \quad (3)$$

де Δn_i – інтенсивність руху, зафіксована у вибірці Δi ; $i = 1, 2, 3, \dots, m$,

$\Delta n_{\max}$ – максимальне значення інтенсивності в серії з m вибірок.

Ще однією з величин, здатних характеризувати динаміку інтенсивності дорожнього руху є коефіцієнт варіації інтенсивності [3]. Коефіцієнт варіації I_N визначається як відношення середнього квадратичного відхилення інтенсивності руху до її математичного очікування в діапазоні вимірювання (реалізації), тобто

$$I_N = \frac{\sigma_N}{M[N(t)]}, \quad (4)$$

де σ_N – середнє квадратичне відхилення (стандарт) інтенсивності руху.

Коефіцієнт варіації $0 \leq I_N \leq 1$ характеризує ступінь відносного відхилення випадкової величини від її середнього значення. Чим менше коефіцієнт варіації, тим більш детермінований стохастичний процес і навпаки – чим більший коефіцієнт варіації, тим більша випадкова складова процесу $N(t)$ [9].

Також проведено оцінку стаціонарності процесу $N(t)$ методом запропонованим в роботі [4]. на базі розрахунків за формулою (5) шляхом порівняння одержаних результатів з заданим граничним значенням критерію $\alpha_{\text{дон}}$.

$$\frac{\sigma_M}{M\{M[N(t)]\}} \leq \alpha_{\text{дон}}, \quad (5)$$

де $\alpha_{\text{дон}} = 0,05$ – задане граничне значення критерію.

$M[N(t)]$ – середнє значення для інтервалу;

$M^*\{M[N(t)]\}$ – середнє значення для всієї реалізації процесу $N(t)$; σ_M – середнє квадратичне відхилення отриманих значень $M[N(t)]$ відносно $M^*\{M[N(t)]\}$. Позначимо критерій стаціонарності за [4] як $\frac{\sigma_M}{M\{M[N(t)]\}} = \alpha$.

Графіки параметрів f_s , I_N та α до Z , що в свою чергу характеризує рівень стаціонарності, зображено на рис.2.

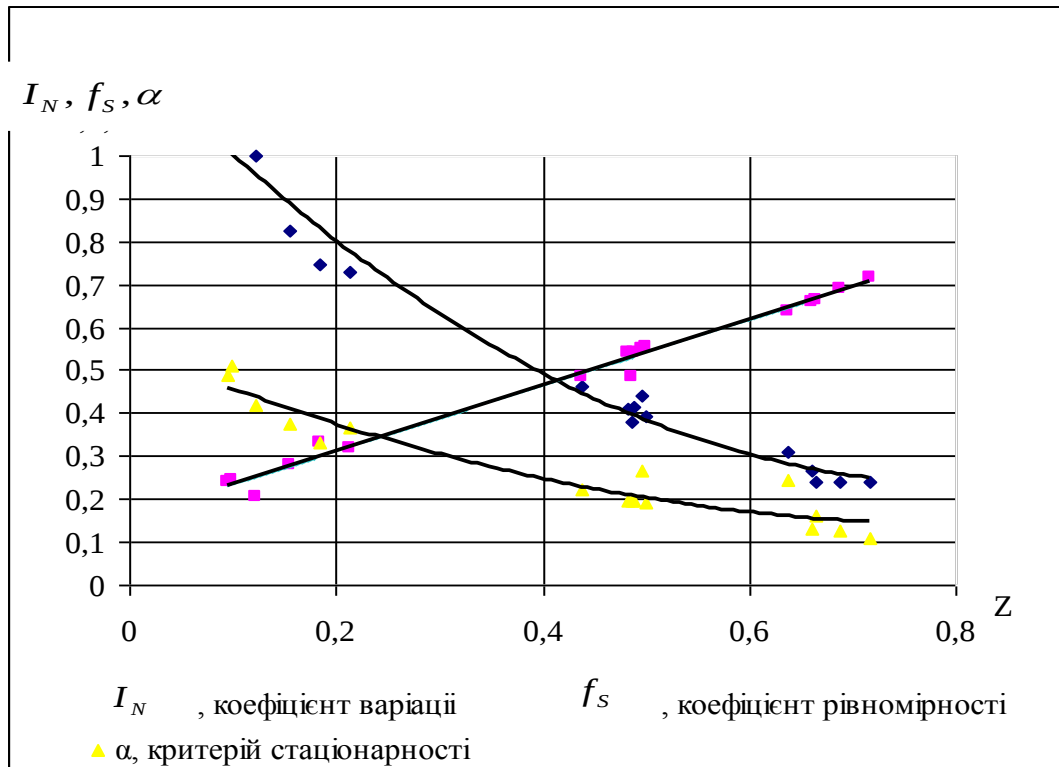


Рис.2. Графіки залежності коефіцієнту варіації I_N , коефіцієнту рівномірності f_s та критерію стаціонарності α від рівня завантаження Z

З графіка видно, що характер залежності $f_s(Z)$ носить лінійний характер, а величини Z та f_s прямо пропорційні, натомість залежності $I_N(Z)$ і $\alpha(Z)$ нелінійні, обернено пропорційний. Значення критерію α у полі значень вибірки експеримента змінюються від 0,1 до 0,5, тобто повністю в нестационарному режимі згідно рівняння (5).

Порівняльний аналіз величин $\frac{\Delta f_s}{\Delta Z}$, $\frac{\Delta I_N}{\Delta Z}$, $\frac{\Delta \alpha}{\Delta Z}$ показав, що коефіцієнт варіації найбільш чутливий до зміни рівня завантаження, а отже, і ступеню стаціонарності.

Висновки

1. Чим вище рівень завантаження ВДМ, тим вище ступінь стаціонарності випадкового процесу $N(t)$.
2. Дані натурного спостереження показали, що при рівні завантаження від 0,1 до 0,7 процес $N(t)$ зберігає нестаціонарний характер з тенденцією описаною в пункті першому даних висновків.
3. Характер залежності $f_s(Z)$ носить лінійний характер, а величини Z та f_s прямо пропорційні, натомість залежності $I_N(Z)$ і $\alpha(Z)$ нелінійні, обернено пропорційний.
4. Аналіз чутливості обраних параметрів оцінки характеру транспортного потоку показав, що коефіцієнт варіації є найбільш чутливим до зміни рівня завантаження ВДМ, а значить і рівня стаціонарності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дидковская Л.С. Определение критериев целесообразности внедрения методов гибкого регулирования. Вместе к эффективному дорожному движению. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. БНТУ. Минск – 2008. - С. 80-85.
2. Єресов В.І., Дідківська Л.С. Ефективність засосування гнучких технологій світлофорного регулювання на перехрестях. Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. Науковий журнал. – Д.: ПП «РВФ Молнія», 2009. -№1. – С. 92-97.
3. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог.- М.: Транспорт, 1984.- 287 с
4. Михайленко В.И., Четверухин Б.М. Управление дорожным движением на автомобильных дорогах.-Урожай, 1991-200с.
5. Єресов В.І., Дідківська Л.С. Оцінка стабільності потоків надходження в інтелектуальних технологіях світлофорного регулювання. Сборник научных статей Международной научно - практической конференции «Безопасность движения и автомобильные дороги. Проблемы, перспективы». Харьков: ХНАДУ, 2009.
6. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Лановий О.Т., Поліщук В.П. Системологія на транспорті. У 5 кн./за заг. Ред. М.Ф.Дмитриченка. Кн. IV: Організація дорожнього руху. - Київ: Знання України, 2006.
7. Руководство по проектированию и внедрению АСУД на базе АСС-УД. – М.: ВНИИБД, 1981
8. Рэнкин В.У., Клафи П., Халберт С. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения. Пер. с англ.-М.:Транспорт, 1981.-592с.